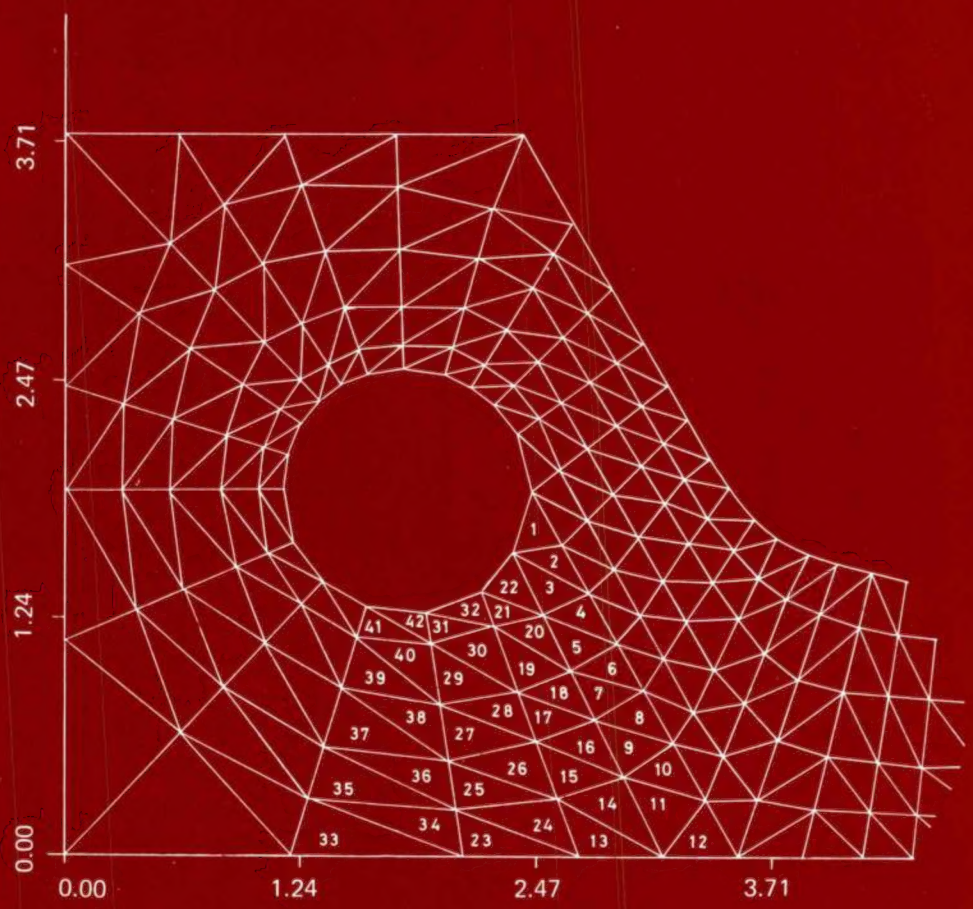
técnica



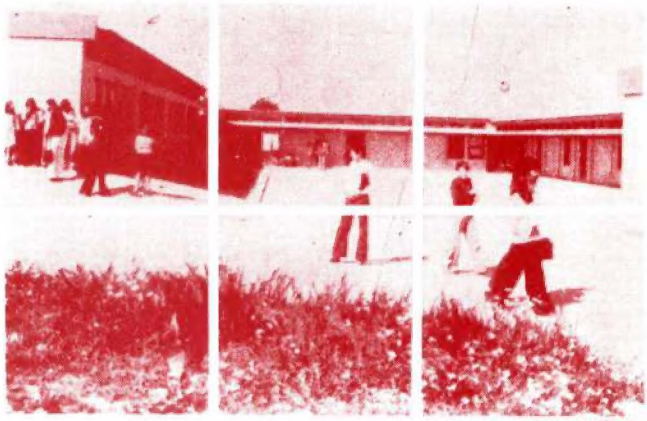
457 associação dos estudantes do instituto superior técnico
fevereiro 1980 revista de engenharia

Já pensou...

... que o seu anúncio
é muito eficaz se for
publicado na revista que
os seus clientes lêem?
Os milhares de exemplares
de cada número da nossa revista
são lidos por engenheiros
e técnicos, por pessoas ligadas
à indústria, à investigação, ao
ensino, pelos seus clientes,
em suma. Consulte-nos

técnica REVISTA DE ENGENHARIA

PRÉ-FABRICAÇÃO
em betão



MOITA

EDIFÍCIOS ESCOLARES
HABITAÇÃO SOCIAL
ESCRITÓRIOS
FÁBRICAS
MORADIAS
ETC.

materiais novobra

Fábricas em: Lisboa, Leiria, Lagoa, Guarda e Moita.

Sede: Av. Est. Unidos da América, 100-5.º Dt.º — Lisboa-5
Telefones — Serviços Administrativos: 77 48 32 - 77 29 53 • Telex: 18373 NOVOBA P
Serviços Técnicos: 89 41 16/7/8 - 89 93 31/2

CONSTRUA COM CONFIANÇA - CONSULTE-NOS

Iluminação pública e industrial.

SCHRÉDER, S.A.R.L.
Carnaxide-Tel.2180037

técnica

NÚMERO 457 FEVEREIRO 1980 ANO LV VOLUME XLI PUBLICAÇÃO MENSAL

DIRECTOR
José Luís S. V. Azevedo

COLABORADORES
João José Águas
Sérgio Duarte Santos (F. C. Tecnologia — Coimbra)

FUNCIONÁRIOS
Jorge Graça
Fernanda Sanches

DIRECÇÃO, REDACÇÃO E ADMINISTRAÇÃO
Av. Rovisco Pais, I.S.T.—1000 Lisboa
Telefone 88 93 23

PROPRIETÁRIO
A. E. I. S. T.

ASSINATURAS: 10 n.os

Continente e Ilhas	450$00
Países de língua Portuguesa e Espanha	550$00
Estrangeiro	700$00 (US$15)
Número avulso ...	80$00

Encontram-se à venda na Secção Técnica, A. E. I. S. T., praticamente todos os números publicados até à data. Os preços são:

1 a 430 (inclusive) — 10$00 ex.
431 a 437 (») — 35$00 ex.
438 a 450 (») — 60$00 ex.
451 e seguintes — 80$00 ex.

* Excepto números duplos ou especiais.

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos autores.

COMPOSIÇÃO E IMPRESSÃO:
OF. GRÁFICAS DE RÁDIO RENASCENÇA
Rua Duques Bragança, 6 — 1200 LISBOA

SUMÁRIO

245 — Análise linear elástica pelo método dos elementos finitos do provete DCB usado em mecânica da fractura — P. M. S. TAVARES DE CASTRO, J. C. RADON e L. E. CULVER.

Linear elastic fracture mechanics analysis of a DCB specimen using the finite element method.

251 — Notas sobre o traçado do diagrama psicrométrico do ar — J. M. BRISSON LOPES.

Plotting of psychrometric charts.

263 — Estudo retrospectivo de cimento Portland de alta resistência inicial com teores de magnésia reputados anormais — M. A. TEIXEIRA DE CASTRO.

Retrospective study on high early strength Portland cement with unusual magnesia content.

275 — Alguns aspectos da energia nuclear de Röntgen ao PWR — RODRIGO DE ABREU.

Some aspects of nuclear energy from Röntgen to PWR.

285 — The teaching of mathematics and physics to engineers and scientists — the presente U. K. position — R. T. SEVERN.

O ensino da matemática e da física para engenheiros e cientistas — a posição actual do Reino Unido.

274 — NOTICIÁRIO

CAPA — Ver fig. 3 do artigo «Análise linear elástica pelo método dos elementos finitos do provete DCB usado em mecânica da fractura» de P. M. S. Tavares de Castro, J. C. Radon e L. E. Culver.

CONSELHO CIENTÍFICO

Alves, Luís de Almeida
Barros, Luís A. Aires
Calado, Jorge C. G.
Conte, J. C.
Costa, Fernando Vasco
Dias, A. Romão
Domingos, J. J. Delgado
Faro, Manuel José de Abreu
Ferreira, J. Campos
Figanier, J. P.
Garrido, M. S.
Horta, Ricardo Bayão
Loureiro, A. Pádua
Manzanares, Alberto Abecassis
Moura, Domingos
Moura, J. M. Fonseca de
Moutinho, A. M. C.
Oliveira, E. R. de Arantes e
Portela, A. Gouvêa
Quintela, António de Carvalho
Rogado, José Quintino
Santos, A. F. Ferreira dos
Serafim, J. Laginha
Simões, F. Rebelo
Silva, J. Borges da
Tavares, L. Valadares
Trindade, Rocha

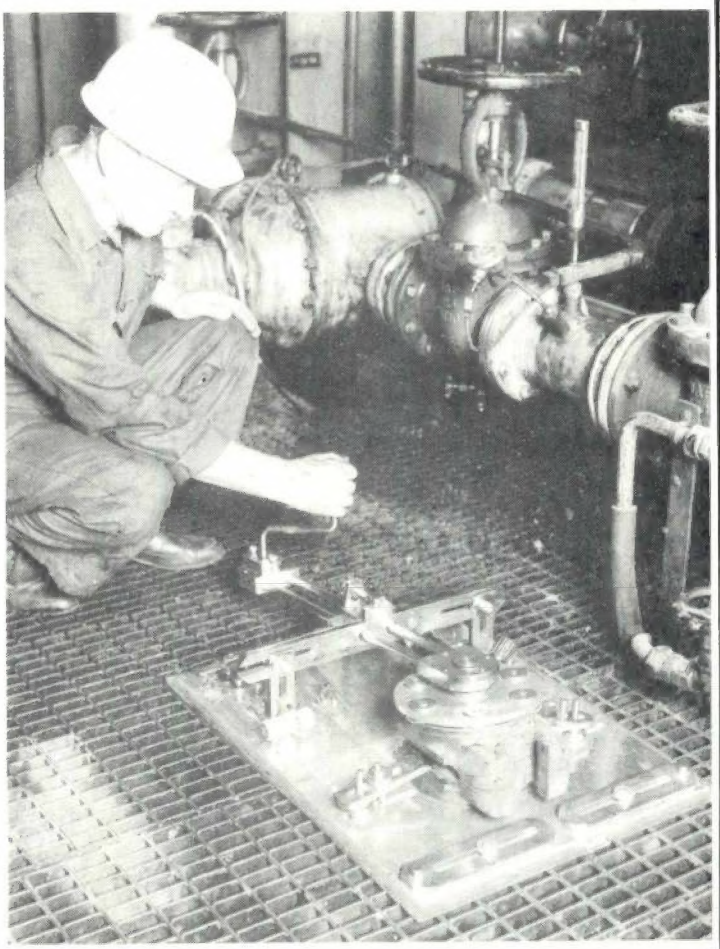
ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
ATLAS COPCO	IX
Construções Schréder	2.ª da capa
FAG Portuguesa, Lda.	III, IV, V e VI
FÉRIA-SERIC, Lda.	II
Ferrominas, E. P.	VIII
HELIAÇO, LDA.	II
Hidrotécnica Portuguesa, Lda.	II
Metropolitano de Lisboa	XI
Novobra, Lda.	2.ª da capa
SETENAVE	3.ª da capa
Soc. Electricidade Brown Boveri	VII
Soc. Portuguesa Cavan	II
S. K. F., Lda.	I
TUDOR	X
YTONG PORTUGUESA	XII

Colaboram neste número as seguintes Agências de Publicidade: SISTEMA, LATINA e HIPER

UNISLIP®

RECTIFICADORAS PARA VÁLVULAS



UMA REVOLUÇÃO NA MANUTENÇÃO DE VÁLVULAS DE CUNHA, DE GLOBO E PARALELAS

AS ÚNICAS RECTIFICADORAS REALMENTE PORTÁTEIS QUE PERMITEM RECTIFICAR:

– A SEDE DA VÁLVULA SEM A RETIRAR DA INSTALAÇÃO;

– A CUNHA DA VÁLVULA JUNTO DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DESTA;

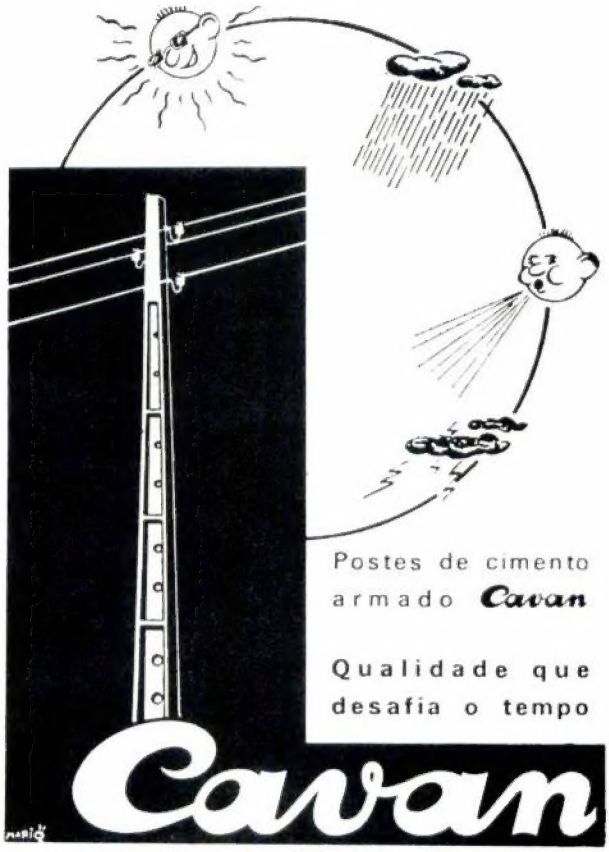
– A ELEVADAS VELOCIDADES COM O AUXÍLIO DE MOTORES DE AR COMPRIMIDO.

SE ESTÁ INTERESSADO PEÇA UMA DEMONSTRAÇÃO À:

SOCIEDADE SKF LIMITADA

1200 LISBOA – PRAÇA DA ALEGRIA, 66-A
TELEF.: 362301 – TELEGR.: ESKAEF – TELEX: 12156

4100 PORTO – RUA DELFIM FERREIRA, 604
TELEF.: 692054 – TELEGR.: ESKAEF



Av. Visconde Valmor, 76-1.º - Tel. 766014 (7 linhas) Lisboa-1

EXPORTAMOS
SERVIÇOS
E TÉCNICA
PARA

· ANGOLA
· ARGÉLIA
· BRASIL
· LÍBIA
· MARROCOS
· MOÇAMBIQUE

HP

HIDROTÉCNICA PORTUGUESA

EDIFÍCIO HP - RUA DA GUINÉ - SACAVÉM - APARTADO 5058 - 1702 LISBOA CODEX

Ventilação de Edifícios

Ventilação Térmica

FÉRIA

(tipo shunt)

Com aprovação do
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Câmara Municipal de Lisboa
Batalhão de Sapadores Bombeiros
Direcção-Geral de Saúde

Exija o documento de viabilidade de utilização do L.N.E.C.

Consulte o Art.º 87 § 2 e Art.º 110 §§ 2 e 3 do R.G.E.U.

Viver é Respirar!

FÉRIA SERIC
Rua S. Sebastião da Pedreira, 108, 1.º
Tels. 54 93 81 - 57 69 77
Consulte o nosso Gabinete Técnico

HELIAÇO

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA
PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«HELIAÇO» E «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 Kg/cm² e Ra = 4000 Kg/cm²
SISMOS
Literatura e tabelas de cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

RUA DE S. JULIÃO, 41, 4.º-D. — LISBOA
Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

SIMMERRING®

Retentores Radiais

Na fabricação de máquinas ou de veículos, na indústria extractiva, em electrotecnia e, de um modo geral, em toda a técnica actual os retentores radiais são elementos indispensáveis.

Em muitos casos esses retentores são SIMMERRING.

Foi há mais de 40 anos que a CARL FREUDENBERG fabricou o primeiro SIMMERRING. Hoje a casa SIMRIT produz, em diversos materiais, retentores radiais de mais de 20 tipos diferentes. Produz, portanto, o retentor adequado para cada caso.

Exemplos: o SIMMERRING BA HD, inteiramente estanque para pressões até 100 Kg/cm²;
O SIMMERRING BASL X 6, especialmente concebido para máquinas de lavar roupa ou louça. O SIMMERRING GWBM, reforçado com tecido e destinado sobretudo a maquinaria pesada; o SIMMERRING de Viton, capaz de suportar temperaturas até 200°C.
Enfim: para cada veio rotativo — ou caixa com rotação — existe o SIMMERRING apropriado.

Se nos consultar, indicar-lhe-emos qual o SIMMERRING certo para o seu caso. Os nossos serviços técnicos estão sempe prontos a contactar consigo.

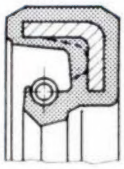
Formas construtivas

Tipo BA
DIN 3760 forma A

Armadura exterior recoberta de borracha

Pode ser usado quando se prevêm dilatações da caixa ou quando as paredes da mesma têm uma certa rugosidade.

Evita o aparecimento de ferrugem.
É próprio para caixas bipartidas e para vedar fluidos gasosos ou de fraca viscosidade.



BA

Tipo B1
DIN 3760 forma B

Armadura exterior metálica

A estanqueidade referente ao lábio exterior é menos eficiente nos casos de grande rugosidade da caixa ou de dilatação térmica da mesma.

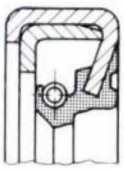
B1

Tipo B2
DIN 3760 forma C

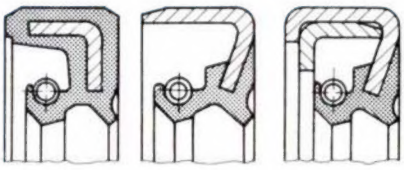
Armadura exterior metálica dupla

A armadura dupla confere ao retentor uma grande rigidez. A montagem e a capacidade de estanqueidade são idênticas às do tipo B1.

É utilizado principalmente para grandes diâmetros e é pouco sensível a erros de montagem.



B2



BA SL **B1 SL** **B2 SL**

Tipos BASL (DIN 3760 forma AS), **B1SL e B2SL**

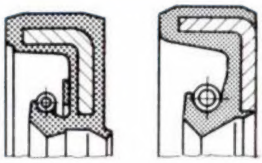
Possuem lábio anti-poeiras para evitar a introdução de poeiras e a corrosão do lábio de vedação.

Tipo BABSL

Com lábio de vedação curto e flexível e com lábio anti-poeiras. Aplica-se para fluídos sob pressão.

Tipo BAHD

Com lábio de vedação curto e flexível. Aplica-se para fluídos submetidos a pressões até 100 Kg/cm².



BA B SL **BA HD**

Tipo GWBM

Particularmente indicado para maquinaria pesada. Por ser de execução separada a sua substituição torna-se mais fácil.

Necessita de ser fixado axialmente. Apresenta vantagens semelhantes ao tipo BA.

GWBM

Para mais informações consulte o nosso catálogo nº 100

CARL FREUDENBERG

FAG PORTUGUESA, L.DA
Rua Delfim Ferreira · PORTO
Telefone: 64141 · Telex: 22300 FAGP

FAG Portuguesa, Lda.

PORTO COIMBRA LISBOA

CARL FREUDENBERG SIMRIT

CONSULTA

NOME E ENDEREÇO DO CLIENTE .....

.....

RESPONSÁVEL/SERVIÇO .....

DATA .....

INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O ESTUDO DE UM PROBLEMA DE ESTANQUEIDADE

TIPO DE MÁQUINA E LOCAL DE MONTAGEM .....

.....

VEIO

Posição do veio — horizontal / vertical

Diâmetro no ponto de estanqueidade ..... mm.

Velocidade de rotação — de ..... a ..... r. p. m.

Velocidade de rotação normal ..... r. p. m.

Sentido de rotação (visto do exterior do carter) — sentido pont. do relógio, duração ..... %
sentido contrário, duração ..... %

Deslocamento axial do veio — curso ..... mm; frequência .....

Veio maciço / veio oco (diâmetro interior ..... mm.)

Casquilho de atrito (espessura ..... mm)

Material do veio ou do casquilho .....

Tratamento de superfície (por ex.º tempera e revenido, cementado, etc.) .....

Dureza RocKwell C .....

Método de acabamento (por ex.º rectificado) .....

Rugosidade Rt ..... μ

Defeito de concentricidade do eixo e do alojamento ..... mm. máx. ..... mm. máx.

Excentricidade do veio ..... mm. máx.

ALOJAMENTO

Diâmetro interior ..... mm.

Profundidade ..... mm.

Rugusidade Rt ..... μ

Material .....

Alojamento fixo / rotativo ..... r. p. m.

FLUIDO A VEDAR

Tipo de fluido .....

Gama de temperaturas de ..... a ..... °C

Temperatura normal de serviço ..... °C

Sobrepressão / depressão no local a vedar, de ..... a ..... bar

Sobrepressão de serviço normal ..... bar

Exposição ao ar livre da câmara a vedar, sim / não

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Influências exteriores (por ex.° água, sujidade etc.) .....

NECESSIDADES PREVISTAS ..... peças / mês / ano / total

CROQUIS DE MONTAGEM com indicação do nível do óleo

técnica

NÚMERO 457 FEVEREIRO 1980 ANO LV VOLUME XLI

Análise linear elástica pelo método dos elementos finitos do provete DCB usado em mecânica da fractura

P. M. S. TAVARES DE CASTRO (1)
J. C. RADON (2)
L. E. CULVER (3)

SUMÁRIO

A deformação linear elástica de um provete DCB (double cantilever beam) foi analisada usando o método dos elementos finitos. Os resultados foram comparados com medições experimentais levadas a cabo em provetes de alumínio. A relação entre a abertura da fissura à face do provete, medida com um transdutor do tipo COD clip gauge, e o deslocamento nos pontos de aplicação da carga, relevante para um conjunto de situações referidas, é apresentada.

ABSTRACT

The Finite Element Method was used in the linear elastic analysis of a DCB (double cantilever beam) specimen. The present results are compared with experimental measurements carried out in aluminium specimens.

A relationship is established between the crack opening displacements, which have been measured with a COD clip gauge, and the displacement of the points where the load is applied. This relationship is established for a relevant range of crack lengths.

1. INTRODUÇÃO

Os provetes mais comuns em estudos experimentais de Mecânica da Fractura, tais como o de flexão em três pontos ou o CT (compact tension) apresentam, a carga constante, um aumento do factor de intensidade de tensão K com o comprimento da fissura a. Porém, se um provete for concebido de tal maneira que a sua compliance (deslocamento dos pontos de aplicação da carga/carga) seja uma função linear do comprimento da fissura, então o factor de intensidade de tensão para uma dada carga será constante e independente do comprimento da fissura, como resulta da seguinte relação da Mecânica da Fractura

$$K = P\left[\frac{E}{2B_n(1-\nu^2)}\,\frac{dC}{da}\right]^{1/2} \qquad (1)$$

na qual C é a compliance, E o módulo de Young, ν o coeficiente de Poisson e B_n a largura da fissura.

Um tal provete foi introduzido por Mostovoy et al [1], que salientaram que para uma geometria deste tipo, consistindo basicamente num par de vigas, obtém-se apreciáveis deslocamentos a cargas relativamente baixas. Consequentemente são facilitadas medições rigorosas da compliance e de dC/da.

De acordo com a discussão apresentada em [1], a seguinte relação

$$(3a^2/h^3) + (1/h) = \text{const} \qquad (2)$$

na qual h representa a altura do provete na extremidade da fissura define o contorno que satisfaz a condição dC/da=const. Uma descrição completa deste provete é oferecida por Radon et al [2].

O provete DCB tem sido usado muito frequentemente para diferentes estudos de Mecânica da Fractura, tais como determinação da resiliência em estado de deformação plano [3], [4], correlações de velocidade de propagação de fissuras de fadiga com parametros da mecânica da fractura linear elástica [3 a 6], estudos de propagação de fissuras de fadiga em con-

(1) Assistente, Faculdade de Engenharia do Porto, Depart. de Eng. Mecânica. Trabalho realizado no Imperial College, Londres. Endereço actual: Cranfield Inst. of Technology, Depart. of Materials, Beds., England

(2) Research Fellow, Imperial College, Londres.

(3) Senior Lecturer, Imperial College, Londres.

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

dições elasto-plásticas [7], estudos de corrosão [8], bem como estudos de propagação de fissuras em condições de fluência [9], [10].

Em alguns destes estudos foram feitas tentativas de obtenção de um modelo analítico da deformação do provete. Uma destas tentativas consiste em tratar os braços do provete como vigas estudadas pela teoria das vigas da Resistência de Materiais [10], [11]. Isto é, no entanto, criticado por alguns autores [12], [13] que defendem que tal análise pode conduzir a deformações substancialmente diferentes das observadas experimentalmente. Um engenhoso refinamento deste tipo de análise é descrito em [11], onde o autor acrescenta às flechas calculadas pela teoria das vigas uma parcela que toma em consideração o efeito de singularidade na extremidade da fissura, calculada supondo que a viga poderia rodar em torno da extremidade da fissura, estando encastrada na extremidade do provete. Foram obtidos resultados satisfatórios, mas esta achega carece de justificação teórica.

2. PRESENTE ANÁLISE

Dado o contorno complicado do provete, uma análise pelo método dos elementos finitos parece ser particularmente aplicável; isto foi sugerido em [13], e levado a cabo em [14], onde os autores analisaram a influência da geometria da extremidade da fenda na compliance do provete, usando os elementos TRIM6 do sistema ASKA.

Foi decidido desenvolver um programa de elementos finitos para analisar uma geometria DCB, Fig. 1, correntemente utilizada no Imperial College, Londres, tratando como primeiro passo o comportamento linear elástico.

É frequentemente necessário determinar a compliance de um provete com base em medições que não são realizadas directamente na linha de aplicação da carga, tal como sucede em estudos de corrosão [13]. Outra situação do mesmo género pode resultar do seguinte: as determinações de compliance são normalmente levadas a cabo em máquinas de ensaio equipadas com registadores de carga e do movimento do travessão, como é relatado, por exemplo, em [9], [11], [13] em que foram utilizadas máquinas Instron; é de esperar, porém, que medições do deslocamento dos pontos de aplicação da carga realizadas com transdutores aplicados no provete sejam mais rigorosas. Na presente geometria, Fig. 1, surge a dificuldade de posicionar o transdutor (clip gauge) na linha de aplicação da carga. Portanto, este tem de ser colocado em apoios convenientes (knife edges) afastados daquela linha. Foi então decidido analisar pelo método dos elementos finitos a relação entre o deslocamento medido pelo transdutor, e o deslocamento que realmente interessa para a determinação da compliance, ao longo da linha de aplicação da carga.

3. O PROGRAMA UTILIZADO

O método dos elementos finitos é hoje uma ferramenta comum para a solução de problemas de mecânica dos meios contínuos, bem documentada em vários livros de texto de diversa extensão, como por exemplo [15], [16].

A presente análise foi levada a cabo com base num programa de elementos finitos disponível no Imperial College, o FLAP3 introduzido por Slater [17]. Resumidamente, o programa analisa elasticamente os pequenos deslocamentos num corpo plano e isotrópico de espessura uniforme, sob condições de estado de tensão ou deformação plano. O plano do corpo é dividido em triângulos, que constituem elementos de espessura unitária, e o programa sintetiza os elementos compondo o corpo de tal modo que existe equilíbrio e compatibilidade de deslocamentos nos nós dos elementos.

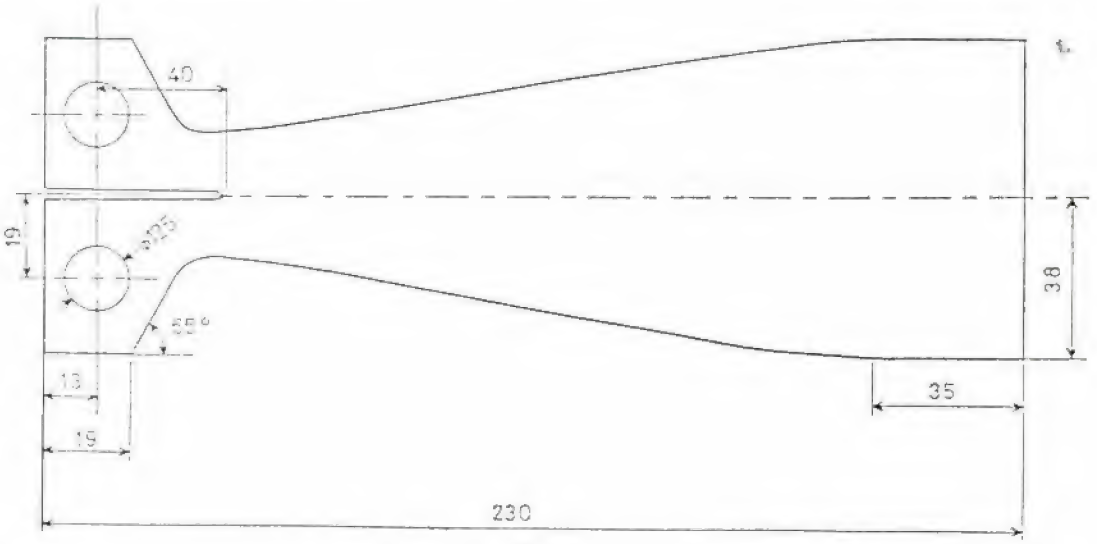


FIG. 1
Provete DCB utilizado no Imperial College. Não se representam entalhes no plano de propagação da fissura (plano de simetria)

As características de deformação dos elementos são tais que o deslocamento varia linearmente em cada elemento, o que assegura que eles se ajustarão perfeitamente quando deformados. As tensões são calculadas a partir dos deslocamentos nodais, e se u e v representam deslocamentos que variam linearmente no elemento nas direcções cartesianas x e y, então as componentes da deformação

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x},\ e_y = \frac{\partial v}{dy},\ e_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{dx} \qquad (3)$$

são constantes em qualquer elemento. As tensões σ_x, σ_y, τ_{xy} são dependentes de e_x, e_y, e_{xy} como segue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \end{Bmatrix} \qquad (4)$$

e serão igualmente constantes em qualquer elemento.

O método de solução da equação de rigidez, no presente programa, é a iteração de Gauss-Seidel, com sobre-relaxação.

4. GERAÇÃO DA REDE

A rede foi concebida por forma a definir o contorno do provete o mais fielmente possível, o que é deveras simples quando são usados elementos triangulares, visto que o contorno pode ser aproximado por uma série de pequenos segmentos de recta, que constituem os lados dos triângulos. Outras considerações têm porém de ser levadas em conta, como a necessidade de ter elementos tão equiláteros quanto possível, e a vantagem de um método automático de numerar elementos.

A rede gerada é apresentada na Fig. 2. Os seguintes pontos devem ser sublinhados:

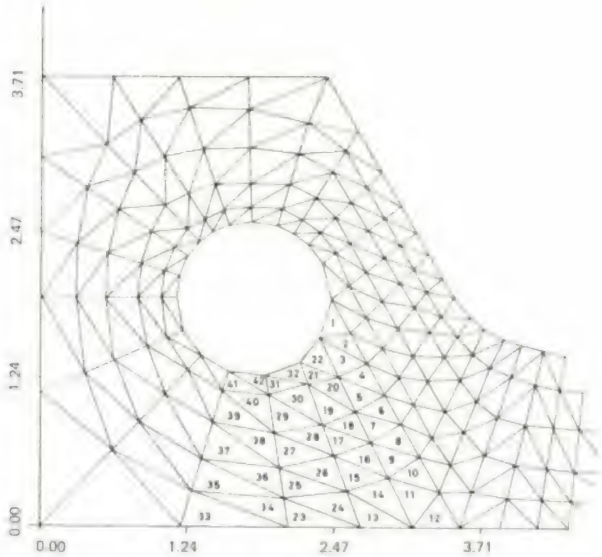


FIG. 3

Técnica de numeração dos elementos

1. Apenas metade do provete foi considerada, tendo em vista a sua simetria.
2. Com excepção de 2 dos 512 elementos que constituem a rede (elem. 1 e 12, Fig. 3), esta é uma tira constituída por linhas de dez elementos, enrolada em torno do orifício do pino de aplicação da carga. Naturalmente, esta concepção permite um muito expedito processo de numeração, Fig. 3.
3. A fissura é simulada impondo dois diferentes conjuntos de condições fronteira ao longo do eixo dos x: os nós dos elementos correspondentes ao comprimento da fissura em estudo têm liberdade de deslocamento em ambas as direcções x e y, excepto o nó correspondente à extremidade da fissura; este, juntamente com os outros nós do plano de simetria pertencentes à parte não fracturada do provete, apenas se podem deslocar na direcção x.
4. Como estaremos tratando deslocamentos medidos nos apoios do transdutor (knife edges), Fig. 4a, o provete é suposto ter o aspecto representado na Fig. 4b, o que permite a comparação entre a análise pelo método dos elementos finitos do deslocamento do ponto A, Fig. 4b, com o deslocamento medido experimentalmente nos apoios (knife edges) pelo transdutor. Esta aproximação justifica-se invocando que numa viga cantilever carregada num ponto situado entre a secção de encastramento e a extremidade livre, o comprimento livre da viga não está sujeito a qualquer

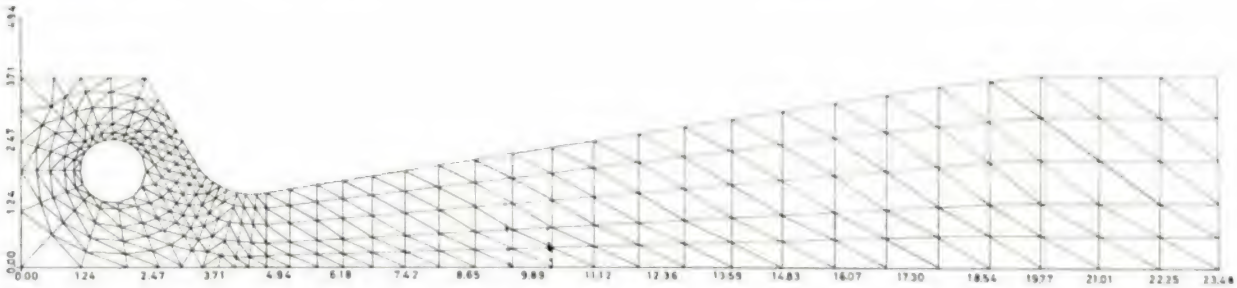


FIG. 2

Provete DCB. Rede de elementos finitos

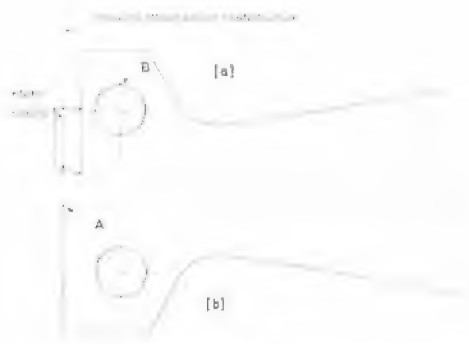


FIG. 4

Provete (a) e idealização para análise pelo método dos elementos finitos (b)

tensão, e deflecte linearmente segundo a tangente à deformada no ponto de aplicação da carga (desprezando o efeito do peso próprio).

As coordenadas da rede foram obtidas a partir de um desenho à escalada 2/1, usando um CADMAC digitizer. Esta máquina lê directamente coordenadas x, y, que imprime em cartão ou fita perfurada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa de elementos finitos foi corrido num computador CDC 6400.

Antes de tratar o problema em análise, o programa foi testado numa situação típica, nomeadamente a de uma viga cantilever de secção rectangular, carregada verticalmente na sua extremidade, Fig. 5. Foi encontrada uma diferença de 8 % entre as flechas calculadas por aplicação da teoria das vigas da Resistência de Materiais e as flechas calculadas usando o programa de elementos finitos, a primeira análise apresentando os valores mais elevados. Além disto, foi verificado que a razão entre as flechas de dois pontos fixos, obtida por aplicação da teoria das vigas, ou pelo método dos elementos finitos, diferia menos de 1 %.

Quanto à análise do provete DCB, dois pontos preliminares devem ser referidos:

Primeiro, conforme sugerido por Gross, Roberts e Srawley [18] o programa foi corrido na versão estado de tensão plano, visto que no provete apenas a região próxima da extremidade da fissura se aproxima do estado de deformação plano, enquanto o restante material se encontra sujeito ao estado de tensão plano.

Em segundo lugar, a carga vertical aplicada foi distribuída pelos nós situados no semicírculo superior do orifício do pino de aplicação da carga.

A base de comparação para a análise pelo método dos elementos finitos do provete DCB consistiu em medições efectuadas com um transdutor (COD clip gauge) aplicado em apoios apropriados (knife edges, Fig. 4a). Estes apoios foram colados ao provete usando ARALDITE RAPID, com uma montagem conveniente para os fixar na posição correcta até à secagem da cola. O transdutor foi calibrado usando um calibrador INSTRON com uma resolução de 0.0025 mm, e o respectivo sinal foi registado num registador BRYANS.

As medições foram obtidas em provetes de alumínio RR58, durante o programa de ensaios de propagação de fissuras de fadiga descrito em [4].

Quanto ao programa do método dos elementos finitos, este foi corrido para diferentes comprimentos da fissura, usando as propriedades mecânicas do alumínio RR58, e os deslocamentos obtidos foram corrigidos para tomar em consideração a espessura dos provetes, 0.95 cm. Na Fig. 6 são comparadas medidas do transdutor e resultados do método dos elementos finitos. Foi obtido um acordo satisfatório, apresentando-se os valores experimentais ligeiramente mais elevados que os valores resultantes da análise de computador. Atribuindo maior confiança às medições experimentais, a diferença obtida pode ter a seguinte justificação: conforme Zienckiewicz [15], é possível mostrar que na ausência de quaisquer tensões ou deformações iniciais, como no caso presente, o método dos elementos finitos subestima o valor da energia de deformação, constituindo uma solução tipo «lower bound».

A razão do deslocamento na posição do transdutor (knife edges) e o deslocamento na linha de aplicação da carga, de interesse prático para situações já descri-

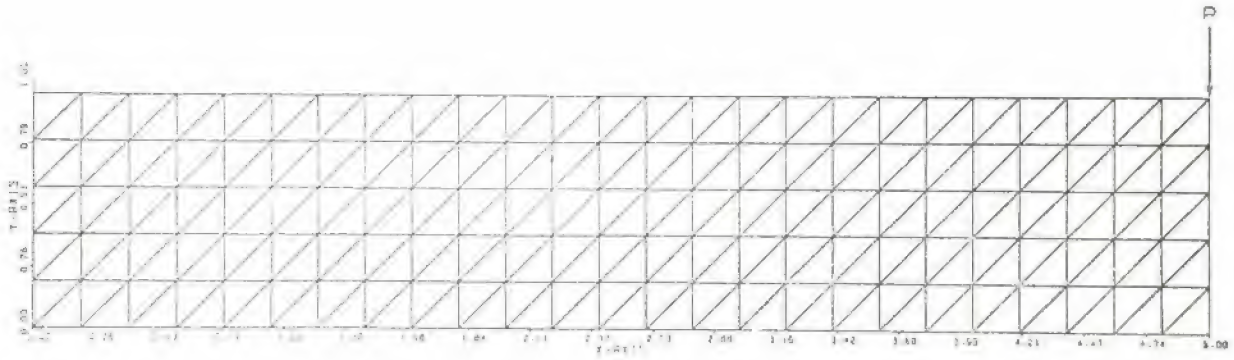


FIG. 5

Viga cantilever. Rede de elementos finitos

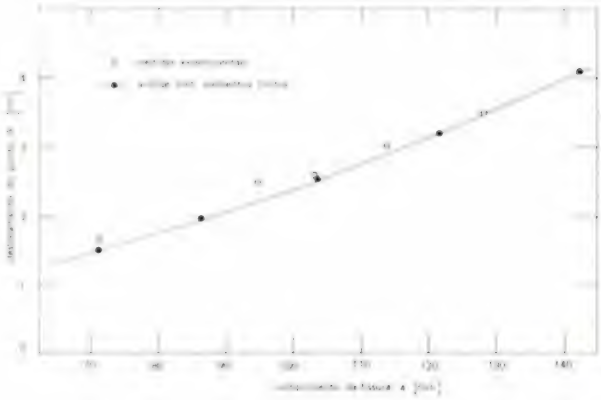


FIG. 6

Deslocamento dos apoios do transdutor, ponto A. Medidas experimentais e resultados do programa de elementos finitos para a mesma carga aplicada (134ON). (Comprimento da fissura, a, medido desde a linha de aplicação da carga)

tas, é apresentada, como função do comprimento da fissura, na Fig. 7. Deve ser apreciado que o aspecto

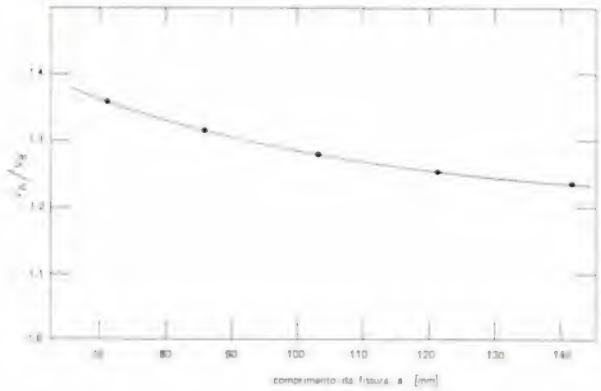


FIG. 7

Análise pelo método dos elementos finitos da razão entre o deslocamento medido pelo transdutor (COD clip gauge) e o deslocamento dos pontos de aplicação da carga, em função do comprimento da fissura, a. (a, medido desde a linha de aplicação da carga)

qualitativo deste resultado era previsível, dado o comportamento comparável a uma alavanca do provete.

Os valores numéricos referidos neste relatório estão coligidos na Tabela I.

6. CONCLUSÕES

Uma descrição satisfatória do comportamento de um provete DCB foi obtida com uma análise pelo método dos elementos finitos usando elementos CST (constant strain triangles).

Após discussão da importância prática do conhecimento da razão entre o deslocamento à face do provete e o deslocamento nos pontos de aplicação da carga, aquela razão é apresentada como função do comprimento da fissura.

AGRADECIMENTOS

Sugestões dos Engenheiros M. F. S. Pereira (IST, Depart. de Eng. Mec., presentemente no Imperial College, Londres) e J. A. B. Duarte Silva (IST, Depart. de Eng. Mec., presentemente no Imperial College, Londres) são agradecidas. Em particular, agradece-se a J. A. B. Duarte Silva o fornecimento de uma cópia do «deck» correspondente ao programa FLAP3.

Um dos autores, P. M. S. T. de C., deseja ainda agradecer à Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, a bolsa de estudos de que tem vindo a beneficiar em Inglaterra.

APÊNDICE: REFERÊNCIAS

[1] **Mostovoy, S.; Crosley, P. B.** and **Ripling, E. J.** — *Use of crack line loaded specimens for measuring plane strain fracture toughness,* J. of Materials, *2,* (3), Sept. 1967, pp. 661.

[2] **Radon, J. C.; Johnson, F. A.** and **Turner, C. E.** — *Use of D. C. B. test in fracture studies,* Conf. on Practical Applications of Fracture Mechanics to Pressure Vessel Technology, London, I. Mech. E., 1971, pp. 48.

[3] **Branco, C. M.; Radon, J. C.** and **Culver, L. E.** — *Influence of mean stress intensity on fatigue crack growth in an aluminium alloy,* J. Mechanical Enginneering Science, *17,* (4), 1975, pp. 199.

[4] **Tavares de Castro, P. M. S.** — *Elastic plastic crack growth,* M. Sc. Thesis, Imperial College, University of London 1976.

[5] **Branco, C. M.; Radon, J. C.** and **Culver, L. E.** — *An analysis of the influence of mean stress intensity and environment on fatigue crack growth in a new high strength Al-alloy,* ASTM J. Testing and Evaluation, *3,* (6), 1975, pp. 407.

[6] **Branco, C. M.; Radon, J. C.** and **Culver, L. E.**— *Growth of fatigue cracks in steel,* Metal Science, May 1976, pp. 149.

[7] **Branco, C. M.; Radon, J. C.** and **Culver, L. E.** — *Elastic plastic fatigue crack growth under load cycling,* J. Strain Analysis, *12* (2), 1977, pp. 71.

[8] **Branco, C. M.; Radon, J. C.** and **Culver, L. E.** — *Influence of specimen orientation and loading history on S. C. C. in an aluminium alloy,* Corrosion Science, 1977, *17,* pp. 125.

[9] **Fragomeni, A. S. P.** — *Application of fracture mechanics to creep cracking, M.* Sc. Thesis, Imperial College, University of London 1976.

[10] **Kenyon, J. L.; Webster, G. A.; Radon, J. C.** and **Turner, C. E.** — *An investigation of the application of fracture mechanics to creep cracking,* Int. Conf. on Creep and Fatigue in Elevated Temperature Applications, Philadelphia, 1973, I. Mech. E. Conf. 13, pp. 1.

[11] **Branco, C. M.** — *A fracture mechanics approach to environmental and elastic plastic fatigue crack propagation*, Ph. D. Thesis, Imperial College, University of London, 1976.

[12] **Srawley, J. C.** and **Gross, B.** — *Stress intensity factors for crack line loaded edge crack specimens*, NASA TN D-3820, 1967.

[13] **Dull, D. L.; Buch, J. D.** and **Raymond, L.** — *Compliance calibrations of a contoured and face grooved double cantilever beam specimen*, Engineering Fracture Mechanics, *4*, 1972, pp. 523.

[14] **Ottens, H. H.** and **Lof, C. J.** — *Compliances of a tapered D. C. B. specimen configuration by a finite element method*, Engineering Fracture Mechanics, *6*, 1974, pp. 573.

[15] **Zienkiewicz, O. C.** — *The finite element method in Engineering Science*, McGraw Hill, London, 1971.

[16] **Fenner, R. T.** — *Finite Element methods for engineers*, MacMillan, London, 1975.

[17] **Slater, D. F. J.** — *A user's mannual for FLAP3 — a finite element computer program for an elastic plane body*, Imperial College, Nov. 1971.

[18] **Gross, B.; Roberts, E.** and **Srawley, J. E.** — *Elastic displacements for various edge cracked plate specimens*, NASA TN D-4232, 1967.

TABELA I

ANÁLISE PELO MÉTODO DOS E. F. DO PROVETE D. C. B.

N.º de elementos CST: 512
Carga aplicada: 1340 N
$E=0.75 \times 10^7$ Nm^{-2}

N.º de nós: 306
Estado de tensão plano
$\nu=0.33$

a) **Output da análise por E. F.**

a (cm)	N.º nós imobil. seg. y	Factor s. relax.	Toler.	N.º ciclos iteração	V_A (cm)	V_B (cm)	$\frac{V_A}{V_B}$
7.14	16	1.992	.1000E-4	833	.7223E-1	.5320E-1	1.3589
8.66	14	1.993	.2774E-4	900	.9349E-1	.7103E-1	1.3162
10.34	12	1.995	.2067E-4	900	.1222E 0	.9542E-1	1.2807
12.18	10	1.996	.1866E-4	900	.1540E 0	.1230E 0	1.2521
14.19	8	1.997	.2859E-4	900	.1953E 0	.1591E 0	1.2272

b) **Deslocamento do transdutor em função de a**

MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS		ANÁLISE POR E. F.	
a (cm)	V_A (mm)	a (cm)	V_A (mm) * **
7.15	1.65	7.14	.723 x 2 x (1/0.95) = 1.520
9.50	2.49	8.66	.935 x 2 x (1/0.95) = 1.969
10.30	2.60	10.34	1.222 x 2 x (1/0.95) = 2.574
11.35	3.01	12.18	1.540 x 2 x (1/0.95) = 3.230
12.80	3.50	14.19	1.953 x 2 x (1/0.95) = 4.113

* x 2, visto que apenas metade do provete foi analisada.
** x (1/0.95), visto que a espessura do provete original não era a unidade, mas sim 0.95 cm.

Notas sobre o traçado do diagrama psicrométrico do ar

J. M. BRISSON LOPES
Universidade Técnica de Lisboa (I. S. T.)
C. T. A. M. F. U. T. L. (I. N. I. C.)

RESUMO

Neste trabalho analisam-se os problemas que surgem quando se traça um diagrama psicrométrico do ar num traçador de gráficos acoplado a um computador. O diagrama que se apresenta é o diagrama entalpia — humidade específica com a linha de 0° C na posição vertical. Confrontam-se algumas expressões de propriedades a representar no diagrama e apresenta-se uma expressão para o cálculo do factor térmico ambiente. Apresentam-se ainda algumas considerações práticas e úteis para o traçado.

ABSTRACT

This paper presents the principal problems occurying when drawing a psychrometric chart on a plotter coupled to a computing system. In this case the chart to be drawn was a distorted enthalpy — moisture content chart in order to present dry bulb temperature and moisture content as the principal axes and a vertical 0° C dry bulb temperature line. A few expressions for the properties are compared and a new expression for the room factor calculation is presented. A few pratical expressions which allow easy plotting of the diagram are discussed.

1. INTRODUÇÃO

O diagrama psicrométrico do ar é um instrumento fundamental para o cálculo e dimensionamento das instalações de ar condicionado, frigoríficas, de secagem e torres de arrefecimento. Por outro lado é também um facto que a maioria dos diagramas disponíveis neste momento nem sempre concordam uns com os outros e além disso apresentam alguns erros que, embora com origem na necessidade de simplificar o traçado, conduzem a não poucas confusões, das quais a mais comum é a verificada entre os vários conceitos de temperatura húmida.

O traçado num traçador de gráficos acoplado a um computador ou a um calculador permite que, para além de uma excelente precisão de marcação dos pontos, seja possível traçar mais correctamente as linhas que aparentando ser rectas o não são (temperatura húmida e volume específico). Isto deve-se a que estas linhas exigem o cálculo dum maior número de pontos e portanto um maior volume de cálculo. Este é facilmente suportado mesmo por um pequeno calculador.

2. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

2.1. Constantes utilizadas

Constante universal dos gases perfeitos — $R_o = 8314{,}3$ J kmole^{-1} K^{-1}

Massa molecular do ar seco — $m_a = 28{,}97$ kg kmole^{-1}

Massa molecular do vapor de água — $m_v = 18{,}02$ kg kmole^{-1}

Constante de gás perfeito do ar — $R_a = 287{,}00$ J kg^{-1} K^{-1}

Constante de gás perfeito do vapor de água — $R_v = 461{,}39$ J kg^{-1} K^{-1}

Pressão atmosférica — $P_{at} = 101325$ Nm^{-2}

2.2. Volume específico

Considerando o ar como um gás perfeito

$$p_a \, v_a = R_a \, T_a$$

A pressão parcial do ar seco é a diferença entre a pressão total atmosférica e a pressão do vapor de água existente na atmosfera e portanto

$$v_a = \frac{R_a \, (t + 273{,}15)}{P_{at} - P_v} \qquad (1)$$

2.3. Pressão de vapor de água

Como é evidente a pressão de saturação do vapor de água a uma dada temperatura é função apenas dessa temperatura.

Manuscrito recebido para publicação em 18/5/77.

Para temperaturas Celsius positivas recolheram-se duas expressões. Segundo Jones **[2]** que cita **[5]** a pressão de saturação do vapor é

$$\log P_v = 33{,}59051 - 8{,}2 \log (t+273{,}15) + 0{,}0024804 \times (t+273{,}15) - \frac{3142{,}31}{t+273{,}15} \qquad (2)$$

expressão válida para o intervalo entre 0° C e 100° C e no qual apresenta o erro relativo máximo de 0,013 % a 0° C em relação aos valores de **[3]**.

Por seu lado Bull **[1]** sugere a expressão

$$\log P_v = \frac{7{,}5\ t}{237{,}3+t} + 2{,}7857 \qquad (3)$$

que no intervalo de 0° C a 100° C apresenta um erro relativo máximo de 0,815 % a 100° C. No anexo 1 é possível comparar os erros relativos de cada uma das expressões propostas e concluir que (2) é bastante precisa e (3) é muito razoável especialmente entre 0° C e 60° C. Aliás, os desvios padrão calculados em pontos equidistantes de 5° C são de respectivamente 2,506 e 239,488 para (2) e (3) no intervalo entre 0° C e 100° C e de 0,399 e 1,969 no intervalo entre 0° C e 60° C. Neste último intervalo os erros relativos máximos são para (2) e (3) respectivamente 0,013 % a 0° C e 0,048 % a 45° C. No diagrama psicrométrico é muito rara a representação para além de 60° C e portanto não será a precisão da expressão que condicionará a escolha mas sim a simplicidade e a rapidez de cálculo da função e da sua inversa. Perante isto é claro que a expressão a aplicar será (3).

Para temperaturas Celsius negativas a pressão de saturação do vapor de água em contacto com gelo é segundo Bull **[1]**

$$\log P_v = \frac{9{,}5\ t}{265{,}5+t} + 2{,}7857 \qquad (4)$$

e segundo Jones **[2]** citando **[4]** é

$$\log P_v = 12{,}5380977 - \frac{2663{,}91}{t+273{,}15} \qquad (5)$$

Comparando com os valores tabelados em **[3]** com valores espaçados de 10° C no intervalo de —40° C a 0° C obtêm-se valores dos erros relativos que se podem apreciar sob forma gráfica no anexo 2. Nesse intervalo o erro relativo máximo e o desvio padrão são respectivamente 0,565 % a —40° C e 0,240 para a expressão (5) e 2,132 % a —40° C e 0,572 para a expressão (4). Assim, e por razões idênticas às apontadas acima, ao escolher (3) para temperaturas Celsius positivas, escolheu-se (5) para temperaturas Celsius negativas.

2.4. Humidade específica

A humidade específica do ar é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco.

$$\omega = M_v/M_a$$

Estas massas ocupam o mesmo volume V e sendo v_a e v_v os volumes específicos do ar seco e do vapor respectivamente

$$V = M_a\ v_a = M_v\ v_v$$

$$\text{pelo que } \omega = \frac{\frac{V}{v_v}}{\frac{V}{v_a}} = \frac{v_a}{v_v}$$

e se pudermos considerar o ar seco e o vapor de água como gases perfeitos

$$\omega = \frac{R_a}{R_v}\ \frac{P_v}{P_a}$$

e como $p_{at} = p_v + p_a$

$$\text{ter-se-á } \omega = \frac{R_a}{R_v}\ \frac{P_v}{p_{at} - p_v} \qquad (6)$$

A expressão de **[6]** é inútil pois a correcção que pretende introduzir não tem qualquer efeito na posição das linhas e complica o cálculo e o traçado.

2.5. Temperatura de bolbo húmido

Mais correntemente denominada temperatura húmida esta temperatura pode ter normalmente três significados distintos: temperatura húmida de saturação adiabática (temperatura húmida termodinâmica) e temperatura de bolbo húmido protegido e não protegido.

A temperatura húmida a representar no diagrama é a última citada pois é a que se determina normalmente com um termómetro cujo bolbo está envolvido numa gaze húmida.

Segundo **[1]** existe uma relação entre a pressão do vapor e a temperatura húmida, que é

$$P_v = P'_v - A\ P_{at}\ (t - t') \qquad (7)$$

O valor da constante A depende da temperatura húmida e do termómetro utilizado. Tem os seguintes valores

Tipo	$t' < 0$	$t' > 0$
Não protegido	$5{,}94 \times 10^{-4}\ K^{-1}$	$6{,}66 \times 10^{-4}\ K^{-1}$
Protegido («screen»)	$7{,}20 \times 10^{-4}\ K^{-1}$	$7{,}99 \times 10^{-4}\ K^{-1}$

2.6. Entalpia específica por kg de ar seco

O estado de referência da escala de entalpia é o estado em que o ar se encontra seco (não há qualquer

vapor de água misturado) e à temperatura de 0° C. Tomando este estado como estado de referência a entalpia do ar seco a uma temperatura t é

$$h_{as} = 1{,}009\ t$$

A entalpia do vapor de água saturado pode ser aproximada pela expressão

$$h_{vs} = 2500{,}8 + 1{,}84\ t$$

Se atentarmos num diagrama de Mollier ou nas tabelas de sobreaquecimento para o vapor de água, vemos que, para as temperaturas e pressões de saturação que se verificam nas zonas de aplicação do diagrama psicrométrico, a entalpia é praticamente só dependente da temperatura e tem um valor idêntico ao da entalpia de saturação, isto é, a baixas pressões o vapor de água comporta-se como um gás perfeito desde a saturação.

Assim e existindo a humidade específica ω, a entalpia específica da massa de ar húmido por kg de ar seco será

$$h = h_{as} + \omega\ h_v$$

ou seja

$$h = t\ (1{,}009 + 1{,}84\ \omega) + 2500{,}8\ \omega \qquad (8)$$

2.7. Humidade relativa

É a razão entre a pressão que o vapor de água exerce a uma dada temperatura e a pressão que exerceria se estivesse saturado a essa mesma temperatura. Expressa em percentagem é

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100\ \%$$

3. O DIAGRAMA NUM PLANO h,ω

De (8) pode concluir-se que num diagrama h,ω, as isotérmicas são rectas não paralelas entre si e de coeficiente angular

$$\left(\frac{dh}{d\omega}\right)_t = 1{,}84\ t + 2500{,}8$$

No que diz respeito às isocóricas se em (6) explicitarmos P_v e substituirmos em (1) conclui-se que

$$t = \frac{v}{R_a}\ P_{at}\ \frac{\dfrac{R_a}{R_v}}{\dfrac{R_a}{R_v} + \omega} - 273{,}15$$

que introduzido em (8) conduz a

$$h = \frac{v_a\ P_{at}}{R_v}\left(\frac{1{,}009 + 1{,}84\ \omega}{\dfrac{R_a}{R_v} + \omega}\right) + 1998{,}204\ \omega - 275{,}60835$$

que não é a equação de uma recta. A sua derivada é

$$\left(\frac{dh}{d\omega}\right)_{v_a} = \frac{v_a\ P_{at}}{R_v}\ \frac{1{,}84\ \dfrac{R_a}{R_v} - 1{,}009}{\left(\dfrac{R_a}{R_v} + \omega\right)^2} + 1998{,}204$$

O afastamento da linearidade é causado pelo termo

$$\frac{v_a\ P_{at}}{R_v}\ \frac{1{,}009 + 1{,}84\ \omega}{\dfrac{R_a}{R_v} + \omega} \qquad (9)$$

que se torna de maior peso na expressão quando os outros termos se anulam, isto é, quando

$$\omega = \frac{275{,}60835}{1998{,}208} = 0{,}138\ kg_v\ kg_a^{-1}$$

nestas circunstâncias a entalpia é igual a

$$h = \frac{v_a\ P_{at}}{R_v} \times 1{,}662$$

Quando (9) toma um valor constante por se desprezar ω (ω=0), h=h (ω, v_a) é uma função tal que

$$h = \frac{v_a\ P_{at}}{R_v} \times 1{,}622$$

o que representa um erro de 2,41 % no caso extremo. Se, por exemplo, se calculassem os valores de $\left(\frac{\partial h}{\partial \omega}\right)_{v_a}$ para a isocórica de 0,86 m^3 kg^{-1} obter-se-ia 2063,6 $kJ(kg_v\ kg_a^{-1})^{-1}$ para ω=0 e 2060,6 $kJ(kg_v\ kg_a^{-1})^{-1}$ para ω=0,015 $kg_v\ kg_a^{-1}$ (ar saturado). As isocóricas podem então ser traçadas por meio de dois segmentos de recta definidos pelos pontos de ar seco, de ar saturado e de humidade específica média destes dois, duma mesma isocórica.

A equação das isotérmicas húmidas obtém-se explicitando P_v na expressão (6) e substituindo o seu valor

em (7). Explicitando t na equação obtida e substituindo em (8) virá

$$h = \left[t' + \frac{1}{A\ P_{at}} \left(P'_v - \frac{\omega\ P_{at}}{\frac{R_a}{R_v} + \omega} \right) \right] (1{,}009 + 1{,}84\ \omega) + 2500{,}8\ \omega$$

que pode ainda escrever-se sob a forma

$$h = \left[1{,}009 \left(t' + \frac{P'v}{A\ P_{at}} \right) + \frac{1{,}84}{A} \frac{R_a}{R_v} \right] + \omega \left[1{,}84 \left(t' + \frac{P'_v}{A\ P_{at}} - \frac{1}{A} \right) + 2500{,}8 \right] - \frac{1}{A \left(\frac{R_a}{R_v} + \omega \right)} \left[1{,}009\ \omega + 1{,}84 \left(\frac{R_a}{R_v} \right)^2 \right]$$

em que o último termo é o responsável pela não linearidade da função. No entanto, se o substituirmos pelo valor que toma quando $\omega = 0$, verifica-se que o erro cometido cresce quando ω aumenta. Esse erro é de cerca de 1,67 % quando $\omega = 0{,}1\ kg_v\ kg_a^{-1}$ e o erro cometido ao determinar $h(\omega, t')$ será menor e, só muito excepcionalmente, igual a 1,67 %. Se se calculassem os valores de $\left(\frac{\partial h}{\partial \omega} \right)_{t'}$ para $t' = 15°\ C$, teríamos o valor de 139,2 $kJ\ (kg_v\ kg_a^{-1})^{-1}$ para $\omega = 0$ e 128,3 $kJ\ (kg_v\ kg_a^{-1})^{-1}$ para $\omega = 10{,}64\ 10^{-3}\ kg_v\ kg_a^{-1}$.

Podemos então proceder da mesma forma que procedemos para as isocoras, isto é, aproximar a linha traçando 2 segmentos de recta, o primeiro entre o ponto de saturação e um ponto médio, o segundo entre este ponto e o ponto em que a linha de temperatura húmida atinge a linha de humidade especifica nula.

4. TRAÇADO DE UM DIAGRAMA t, ω

4.1. Os factores de escala

O diagrama t, ω é, na realidade um diagrama h, ω que sofreu uma distorção de modo a que a linha de 0° C de temperatura húmida seja vertical aparentando o eixo das abcissas ser o eixo das temperaturas secas. Na realidade as linhas de temperatura seca positiva têm um declive positivo tanto menor quanto maior a temperatura e as de temperatura seca negativa têm declive negativo que decresce com a diminuição da temperatura. A distorção é obtida pela rotação das linhas de entalpia especifica no sentido directo, mantendo-se horizontais as linhas de humidade específica. As isentálpicas continuam assim a ser paralelas.

O diagrama tem uma área útil de comprimento x_o e altura y_o tal como a fig. 1 mostra sendo nosso objectivo o traçado do diagrama psicrométrico entre as temperaturas t_1 e t_2 e as humidades o e ω_{max}. Como as linhas de temperatura seca negativa se inclinam para a esquerda à medida que a temperatura baixa, é o ponto de saturação a t_1 que ficará mais à esquerda do diagrama, representado pelo ponto 3 da fig. 1 ($t_3 = t_1$ e $\omega_3 = \omega'(t_1)$). Por argumento semelhante é fácil concluir que o ponto mais à direita é o de temperatura seca t_2 e humidade especifica ω_{max} ou seja o ponto 5 tal que $t_5 = t_2$ e $\omega_5 = \omega_{max}$.

Considerando o ponto 8 ($t_8 = 0°\ C$ e $\omega_{max} = \omega_5$) é imediato que a sua entalpia especifica é

$$h_8 = 2500{,}8\ \omega_5$$

e a entalpia especifica do ponto 5 é

$$h_5 = t_2\ (1{,}009 + 1{,}84\ \omega_5) + 2500{,}8\ \omega_5$$

cuja diferença é

$$h_5 - h_8 = t_2\ (1{,}009 + 1{,}84\ \omega_5)$$

que na horizontal equivale a x_2. Ora, quando $\omega = o$ tem-se

$$t_{10} - t_9 = \frac{h_5 - h_8}{1{,}009} = t_2 \left(1 + \frac{1{,}84}{1{,}009} \omega_5 \right)$$

No diagrama os pontos 9 e 10 estarão então distanciados de x_2 que é a distância entre os pontos 0 e 7. Como $t_o = 0°\ C$, a temperatura do ponto 7 será

$$t_7 = t_2 \left(1 + \frac{1{,}84}{1{,}009} \omega_5 \right)$$

De modo semelhante, como x_1 é a distância entre 3 e 11 que é igual à distância entre 12 e 13. Ter-se-á

$$t_{13} - t_{12} = \frac{h_{11} - h_3}{1{,}009} = - \frac{t_1\ (1{,}009 + 1{,}84\ \omega_3) + 2500{,}8\ \omega_3 - 2500{,}8\ \omega_3}{1{,}009}$$

ou seja

$$t_{13} - t_{12} = - t_1 \left(1 + \frac{1{,}84}{1{,}009} \omega_3 \right)$$

e portanto

$$t_6 = t_1 \left(1 + \frac{1{,}84}{1{,}009} \omega_3 \right)$$

que dista x_1 do ponto 0

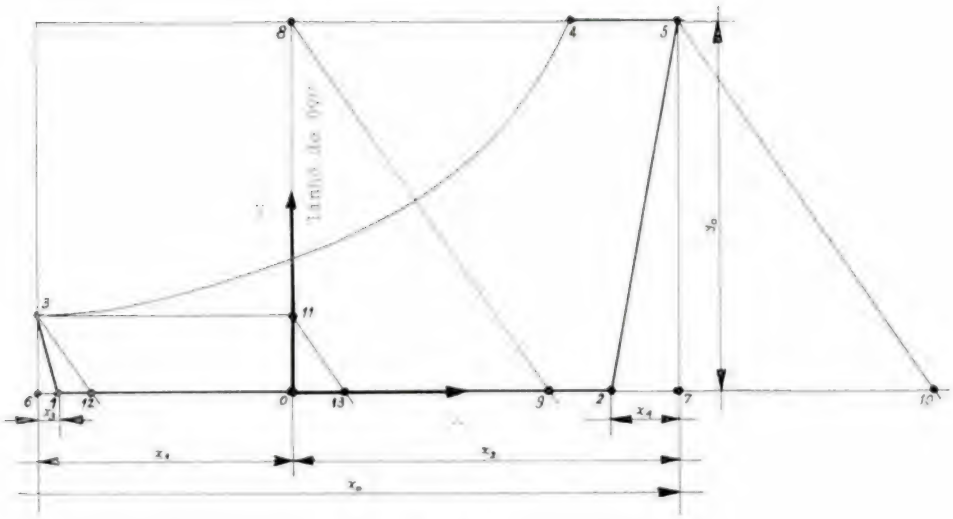


FIG. 1

Assim podemos definir um factor de escala f_1 para a linha para a qual $\omega = 0$ que relacione comprimentos com temperaturas e ter-se-á

$$f_1 = \frac{x_0}{t_7 - t_6}$$

Também é possivel definir um factor de escala para os ordenados e que é

$$f_2 = \frac{y_0}{\omega_5}$$

Para que seja possivel marcar um ponto do qual se conheçam a temperatura e a humidade especifica há ainda que contornar o problema derivado do facto das linhas de temperatura seca constante não serem verticais. Os pontos que tenham humidade especifica diferente de zero terão um deslocamento horizontal em relação ao ponto à mesma temperatura e humidade especifica nula que depende e é proporcional à humidade especifica e à temperatura do ponto que se pretende representar. Assim

$$x = a_1 \; t \; \omega$$

que será positivo ou negativo conforme t for positivo ou negativo, o que está de acordo com o que já foi dito. As distâncias x_3 e x_4 são

$$x_3 = -a_1 \; t_1 \; \omega_3$$
$$x_4 = a_1 \; t_2 \; \omega_5$$

cuja soma é

$$x_3 + x_4 = a_1 \; (t_2 \; \omega_5 - t_1 \; \omega_3)$$

e cuja diferença para x_0 é a distância entre os pontos 1 e 2. Esta diferença é $f_1 \; (t_2 - t_1)$ e assim

$$x_3 + x_4 = x_0 - f_1 \; (t_2 - t_1)$$

donde

$$a_1 = \frac{x_0 - f_1 \; (t_2 - t_1)}{t_2 \; \omega_5 - t_1 \; \omega_3}$$

Como é fácil verificar pela figura 2a a diferença entre x_0 e $f_1 (t_2 - t_1)$, quando t_1 é positiva, é x_4 pelo que a_1 é

$$a_1 = \frac{x_0 - f_1 \; (t_2 - t_1)}{t_2 \; \omega_5}$$

Observando a figura 2b e por motivos idênticos a diferença entre x_0 e $f_1 \; (t_2 - t_1)$ reduz-se a x_3 e assim a_1 é

$$a_1 = \frac{x_0 - f_1 \; (t_2 - t_1)}{t_1 \; \omega_3}$$

Com estes factores de escala o traçado das linhas de temperatura seca, humidadde especifica e humidade relativa constantes é imediato.

4.2. Traçado das isocóricas

Para ar seco com um volume especifico v_a tem-se a temperatura

$$t = \frac{P_{at} \; v_a}{R_a} - 273{,}15$$

Quando se tratar de um ponto de volume especifico do ar seco v_a situado sobre a linha de saturação do qual se pretende determinar a temperatura há que resolver em ordem a essa mesma temperatura a equação

$$f = (P_{at} - P_v) \; v_a - (t + 273{,}15) \; R_a$$

cuja solução é rápida por um método iterativo (Newton--Raphson, por exemplo).

Querendo calcular a humidade especifica de um ponto de temperatura t_o e volume especifico do ar seco v_a, bastará calcular P_v

$$P_v = P_{at} - \frac{R_a \; (t_o + 273{,}15)}{v_a}$$

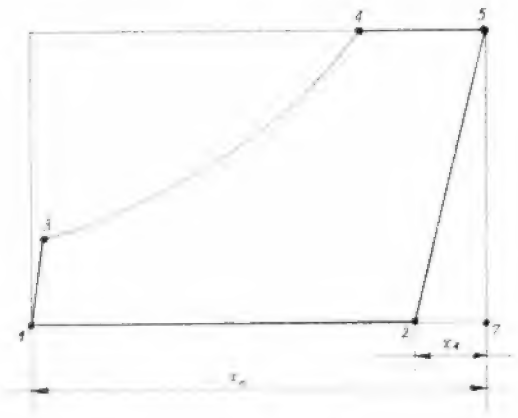


FIG. 2 a

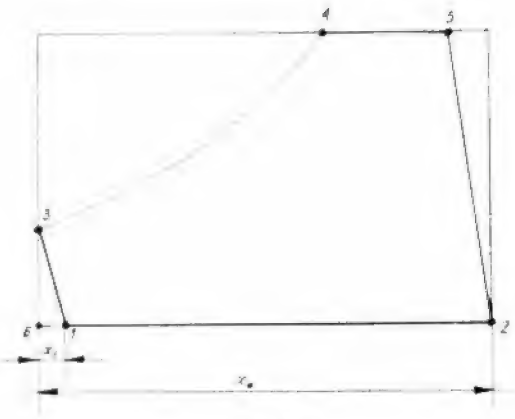


FIG. 2 b

e calcular ω por meio de (6). No caso contrário (ω conhecido) ter-se-á

$$P_v = \frac{\omega\ R_v\ P_{at}}{R_a + \omega\ R_v}$$

e portanto

$$t = \frac{P_{at}\ v_a}{R_a + \omega\ R_v} - 273{,}15$$

4.3. Traçado das isentálpicas

As isentálpicas são linhas paralelas que no plano x, y têm a equação geral

$$y = a_3\ x + b$$

A linha que na fig. 1 une 8 a 9 é a isentálpica representativa de $h = 2500.8\ \omega_5$ e assim a_3 será

$$a_3 = \frac{y_8 - y_9}{x_8 - x_9} = \frac{f_2\ \omega_5}{f_1\left(0 - \dfrac{2500{,}8\ \omega_5}{1{,}009}\right)} = -\frac{f_2}{f_1}\ \frac{1{,}009}{2500{,}8}$$

Para calcular o parâmetro b duma dada isentálpica bastará então conhecer o ponto em que ela corta a linha $\omega = 0\ kg_v\ kg_a^{-1}$.

Quando for caso de calcular a humidade especifica de um ponto de entalpia h e temperatura t_o ter-se-á

$$\omega = \frac{h - 1{,}009\ t}{1{,}84\ t + 2500{,}8}$$

4.4. Traçados das linhas de temperatura húmida constante

O cálculo do ponto sobre a linha de saturação com temperatura húmida t' é imediato pelo que não nos debruçaremos sobre ele. Para o cálculo de um ponto sobre a linha $\omega = 0$ é evidente que de (7) se tem

$$t = \frac{P'_v}{A\ P_{at}} + t'$$

Em casos em que se conheçam t e t', calcular-se-á P_v através de (7) e introduzindo este valor em (6) obter-se-á ω.

4.5. Traçado das linhas de factor térmico ambiente constante

Segundo **[1]** é possível calcular o declive que estas linhas têm no papel impondo uma diferença de entalpia (ver fig. 3) $h_3 - h_1 = H$ entre os pontos 1 e 3. Deste modo.

$$d_1 = (x_4 - x_1)\ \text{sen}\ \beta = \frac{h_3 - h_1}{1{,}009}\ f_1\ \text{sen}\ \beta = \frac{H}{1{,}009}\ f_1\ \text{sen}\ \beta$$

e

$$d_2 = \frac{d_1}{\text{sen}\ (\alpha + \beta)} = \frac{H}{1{,}009}\ f_1\ \frac{\text{sen}\ \beta}{\text{sen}\ (\alpha + \beta)}$$

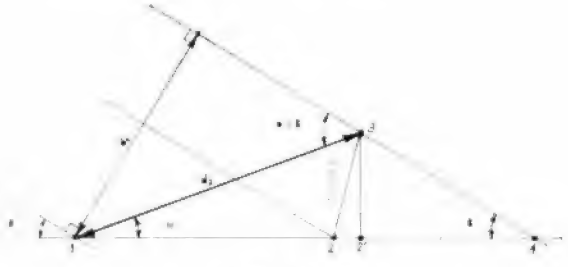


FIG. 3

Por seu lado $\text{sen}\ \alpha = \dfrac{(\omega_3 - \omega_{2'})\ f_2}{d_2}$

o que nos leva a $\text{sen}\ \alpha = \dfrac{f_2}{f_1}\ \dfrac{1{,}009}{H}\ (\omega_3 - \omega_{2'})\ \dfrac{\text{sen}\ (\alpha+\beta)}{\text{sen}\ \beta}$

separando vem

$$\frac{\text{sen}\ (\alpha+\beta)}{\text{sen}\ \alpha\ \text{sen}\ \beta} = \frac{f_1}{f_2}\ \frac{1}{1{,}009}\ \frac{H}{\omega_3 - \omega_{2'}}$$

donde $\text{tg}\ \alpha = \dfrac{1}{\dfrac{f_1}{f_2}\ \dfrac{1}{1{,}009}\ \dfrac{H}{\omega_3 - \omega_{2'}} - \dfrac{1}{\text{tg}\ \beta}}$

e como $\text{tg}\ \beta = -a_3$ (ver dedução do declive das isentálpicas) e como $\omega_{2'} = \omega_2$

$$\text{tg}\ \alpha = \frac{1}{\dfrac{f_1}{f_2}\ \dfrac{1}{1{,}009}\ \dfrac{H}{\omega_3 - \omega_2} + \dfrac{1}{a_3}}$$

O factor térmico ambiente é, por definição,

$$r = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} = \frac{(h_3 - h_1) - (h_3 - h_2)}{h_3 - h_1} = 1 - \frac{h_3 - h_2}{H}$$

como $t_3 = t_2$ virá

$$h_3 = t_3\ (1{,}009 + 1{,}84\ \omega_3) + 2500{,}8\ \omega_3$$

$$h_2 = t_3\ (1{,}009 + 1{,}84\ \omega_2) + 2500{,}8\ \omega_2$$

cuja diferença é

$$h_3 - h_2 = (\omega_3 - \omega_2)\ (1{,}84\ t_3 + 2500{,}8)$$

que substituída na expressão de r conduz a

$$\frac{H}{\omega_3 - \omega_2} = \frac{1{,}84\ t_3 + 2500{,}8}{1 - r}$$

que substituda na expressão de $\text{tg}\ \alpha$ nos permite concluir que

$$\alpha = \text{arctg}\ \frac{1}{\dfrac{f_1}{f_2}\ \dfrac{1{,}84\ t_3 + 2500{,}8}{1{,}009}\ \dfrac{1}{1-r} + \dfrac{1}{a_3}}$$

que é diferente e mais cómoda que a expressão proposta por **[1]**.

Assim, escolhendo uma temperatura t_3 é possível calcular todos os factores térmicos ambientes em relação a essa temperatura.

5. TRAÇADO DO DIAGRAMA

Com base no anteriormente exposto foi escrito um programa para o calculador Helwlett Packard 9830A existente no CTAMFUTL. Este programa permite o traçado do diagrama psicrométrico do ar entre duas temperaturas e entre o valor zero e um valor escolhido da humidade específica. O traçado de cada uma das seis famílias de linhas do diagrama é executado por seis partes independentes do programa, accionadas separadamente. Além disso o traçado do diagrama pode ser feito num intervalo qualquer de temperatura que não inclua o valor 0° C, o que possibilita o traçado de diagramas para aplicações específicas, como é o caso de diagramas para uso em instalações de secagem, armazéns frigoríficos ou túneis de congelação.

A figura 4 apresenta o diagrama mais comum (que é o utilizado em climatização) no intervalo de temperatura — 20° C a + 45° C e até 0,03 $kg_v\ kg_a^{-1}$. As figuras 5 e 6 apresentam diagramas nos quais não é representada a linha de temperatura seca de 0° C. Na primeira temos um intervalo de temperatura de 15° C a 60° C com a humidade específica máxima de 0,035 $kg_v\ kg_a^{-1}$. Na segunda representa-se o diagrama psicrométrico do ar para o intervalo de temperatura de —40° C a —5° C e até à humidade específica de 0,002 $kg_v\ kg_a^{-1}$.

No canto superior esquerdo dos diagramas encontra-se o ábaco para os factores térmicos ambientes. A cruz que se encontra um pouco para a direita do ábaco indica o ponto com o qual se deve unir o ponto do ábaco com um valor do factor térmico ambiente para se obter o declive das linhas do diagrama com esse mesmo factor térmico. Nos diagramas que se apresentam as temperaturas de referência para a construção dos ábacos foram respectivamente 20° C, 50° C e —20° C.

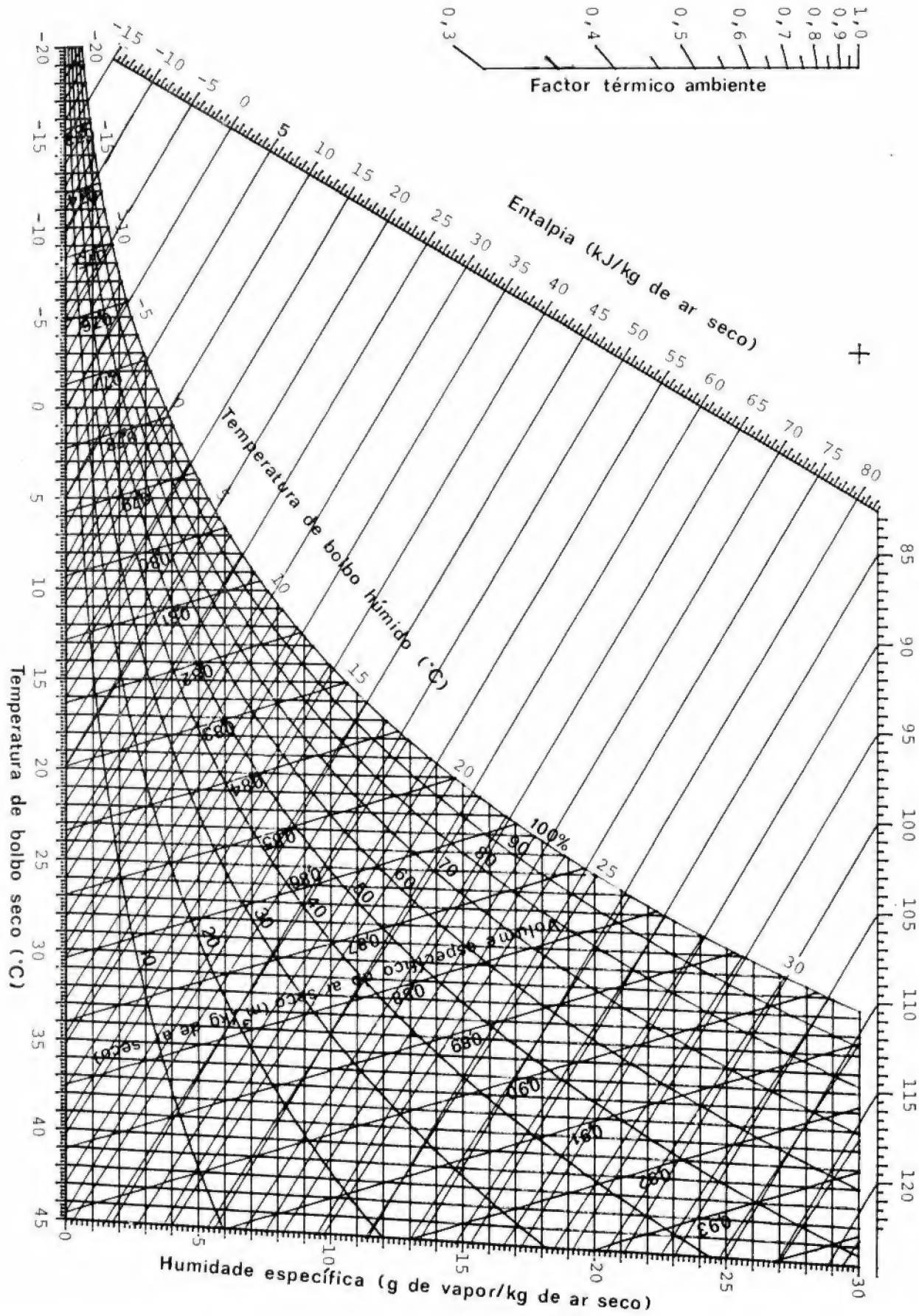
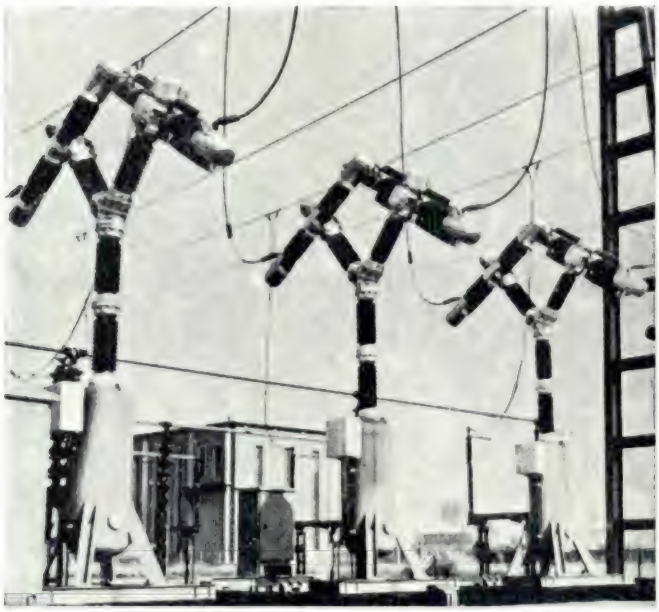

Factor térmico ambiente
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
Entalpia (kJ/kg de ar seco)
Temperatura de bulbo úmido (°C)
Temperatura de bulbo seco (°C)
Humidade específica (g de vapor/kg de ar seco)
Volume específico m³ ar seco/kg de ar seco
100%

FIG. 4

Disjuntores Brown Boveri de ar comprimido para instalações ao ar livre, para as mais elevadas capacidades de ruptura e tensões de serviço



Instalação de disjuntores ao ar livre, de 245 kV, em serviço na Electricité de France, com disjuntores de ar comprimido, tipo DLF 245, capacidade de ruptura 12 GVA.

Fornecemos:

Disjuntores de ar comprimido para instalações ao ar livre, para tensões de serviço de 72.5 até 765 kV
Correntes nominais de 2000 até 4000 A
Correntes de ruptura até 72 kA

- Elevado grau de segurança
- Construção robusta
- Amplas possibilidades de adaptação ao funcionamento com potências mais elevadas de ruptura devido ao tipo de construção por blocos
- Tempos mínimos de disparo
- Aptos a reengate automático rápido

Aproximadamente 20 000 disjuntores Brown Boveri de ar comprimido instalados ao ar livre garantem em 45 países o funcionamento de rêdes de alta tensão.

BROWN BOVERI

Representada em Portugal por:

Sociedade de Electricidade

Brown Boveri Limitada

Rua de Sá da Bandeira, 481-2°, Porto

151 663 d VI

MONCORVO
fonte de riqueza

A FERROMINAS prepara a extracção do minério de ferro de Moncorvo.

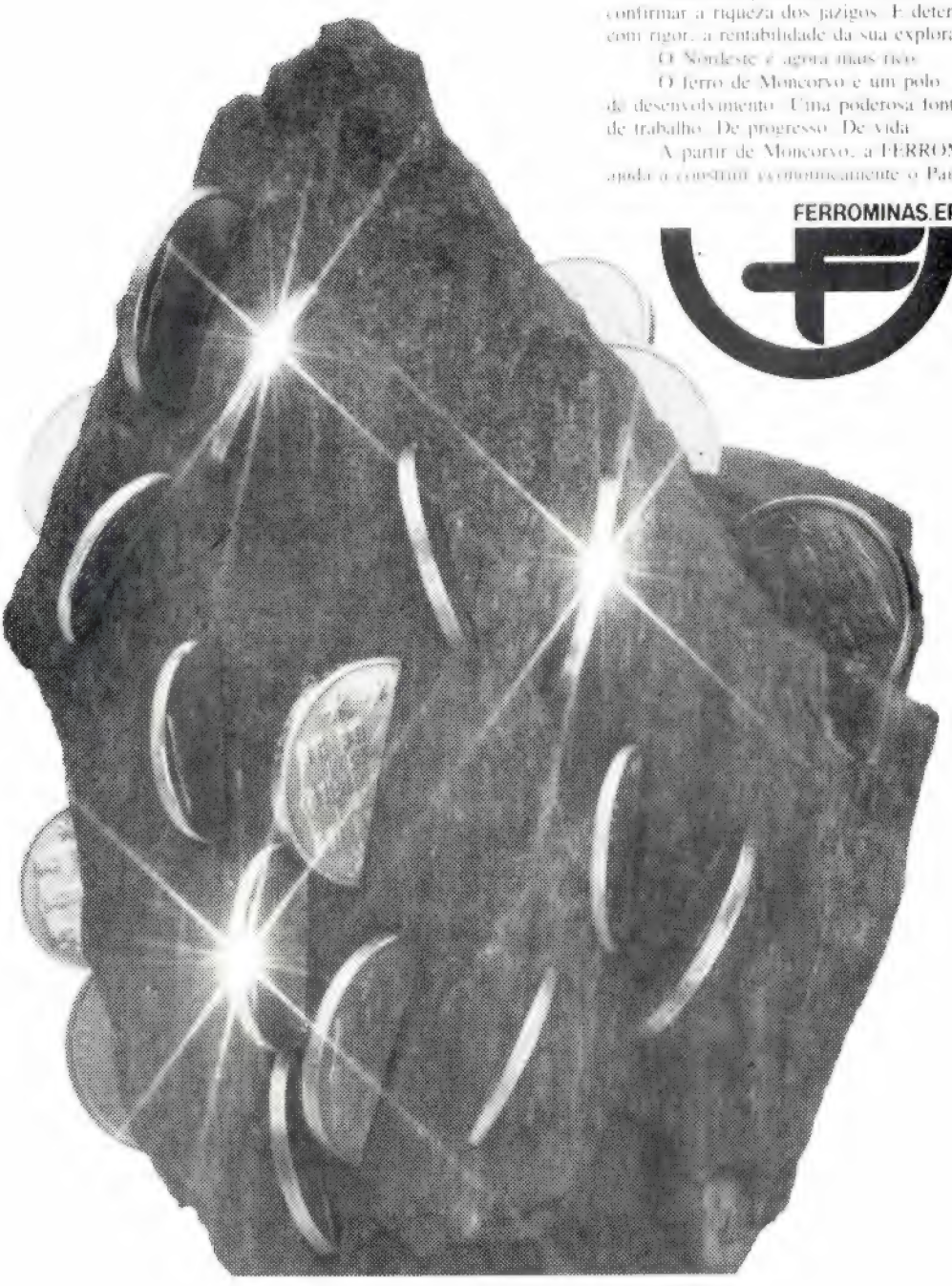
Modernos processos tecnológicos permitiram confirmar a riqueza dos jazigos. E determinar, com rigor, a rentabilidade da sua exploração.

O Nordeste é agora mais rico.

O ferro de Moncorvo é um polo de desenvolvimento. Uma poderosa fonte de trabalho. De progresso. De vida.

A partir de Moncorvo, a FERROMINAS ajuda a construir economicamente o País.

FERROMINAS.EP



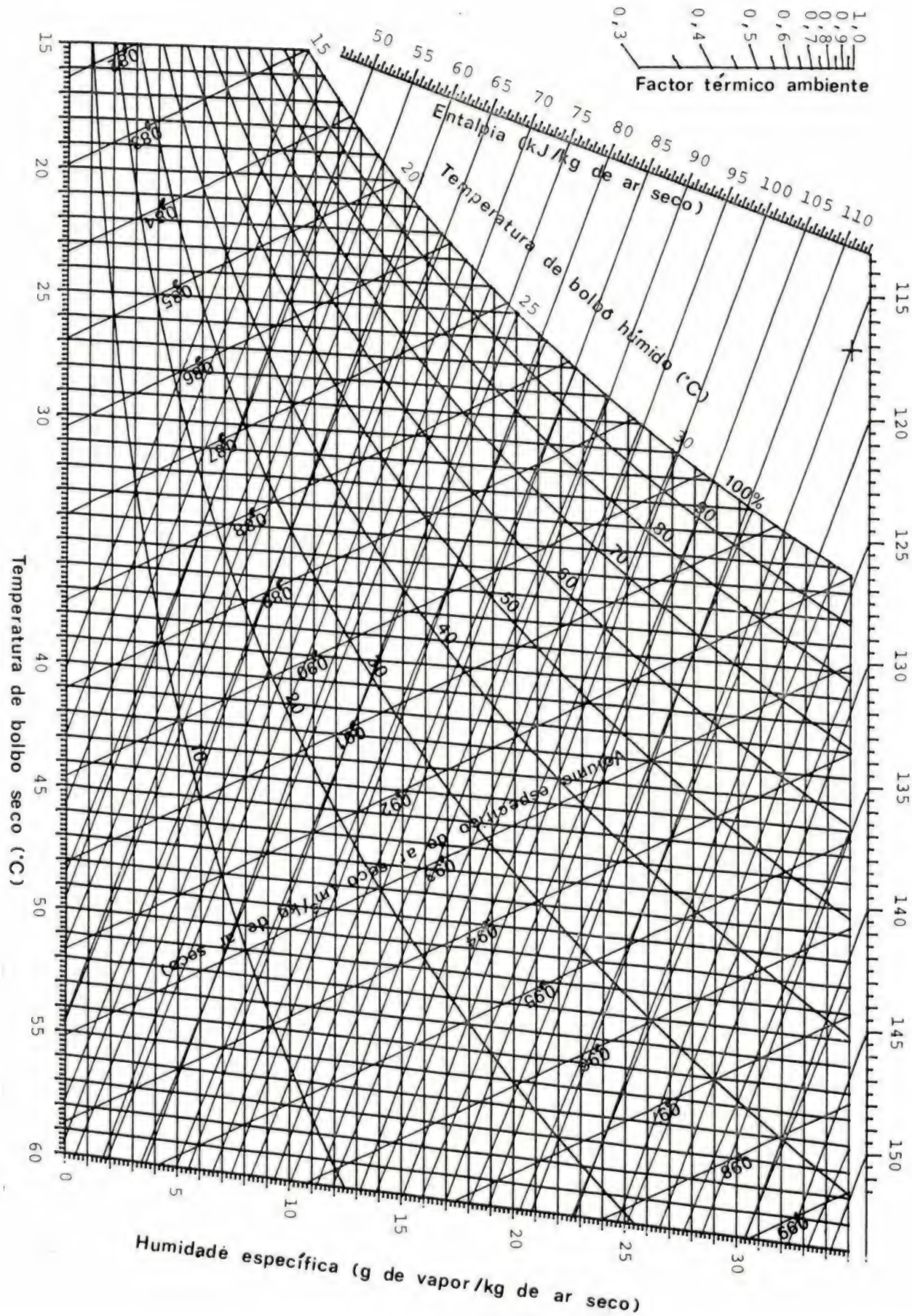

Factor térmico ambiente
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
Entalpia (kJ/kg de ar seco)
Temperatura de bulbo úmido (°C)
100%
Volume específico de ar seco (m³/kg de ar seco)
Temperatura de bulbo seco (°C)
Humidade específica (g de vapor/kg de ar seco)

FIG. 5

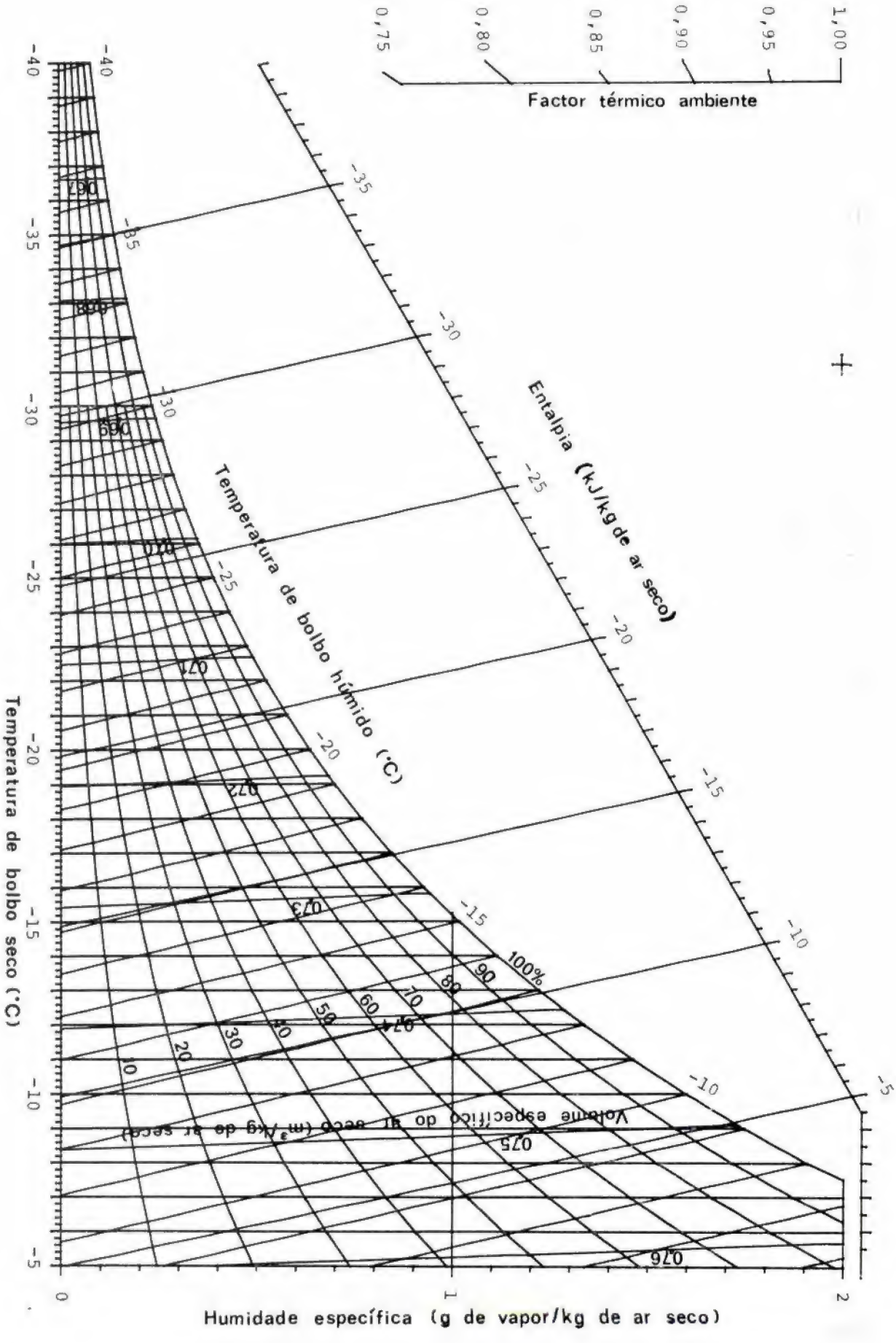

Factor térmico ambiente
0,75
0,80
0,85
0,90
0,95
1,00
Entalpia (kJ/kg de ar seco)
Temperatura de bolbo húmido (°C)
Temperatura de bolbo seco (°C)
Humidade específica (g de vapor/kg de ar seco)
Volume específico do ar seco (m³/kg de ar seco)
100%
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40

FIG. 6

SIMBOLOGIA

A	— constante da equação das isotérmicas húmidas	K^{-1}
a_1	— factor de inclinação das isotérmicas secas	mm $(kg_v\, kg_a^{-1})^{-1}\ °C^{-1}$
a_3	— declive das isentálpicas	
f_1	— factor de escala das abcissas	mm K^{-1}
f_2	— » » » » ordenadas	mm $(kg_v\, kg_a^{-1})^{-1}$
h	— entalpia do ar húmido	kJ kg_a^{-1}
h_{as}	— entalpia do ar seco	»
h_v	— entalpia do vapor de água	kJ kg_v^{-1}
h_{vs}	— » » » » » saturado	»
m_a	— massa molecular média do ar	kg $kmole^{-1}$
m_v	— » » do vapor de água	»
P_a	— pressão parcial do ar seco no ar húmido	N m^{-2}
P_{at}	— pressão atmosférica	»
P_v	— pressão parcial do vapor de água no ar húmido	»
P'_v	— » » » » » » saturado a t'	»
R_a	— constante média de gás perfeito do ar	J $kg^{-1}\ K^{-1}$
R_v	— » de gás perfeito do vapor de água	»
R_o	— constante universal dos gases perfeitos	J $kmole^{-1}\ K^{-1}$
T	— temperatura absoluta	K
t	— temperatura seca do ar	°C
t'	— temperatura húmida do ar	°C
v_a	— volume específico do ar seco	$m^3\ kg^{-1}$
v_v	— » » » vapor de água	»
x_o	— largura útil para o traçado do diagrama	mm
x_i	— abcissa do ponto i	»
y_o	— altura útil para o traçado do diagrama	»
y_i	— ordenada do ponto i	»

Letras gregas

α	— ângulo de factor térmico ambiente	rad
φ	— humidade relativa	%
ω	— humidade absoluta	$kg_v\, kg_a^{-1}$
$\omega'(t_i)$	— humidade absoluta de saturação a $t = t_i$	»

BIBLIOGRAFIA

[1] **Bull, L. C.**, *Design and use of the new I. H. V. E. psychrometric chart*, Journal of the I. H. V. E., October 1964, pags. 268-278.

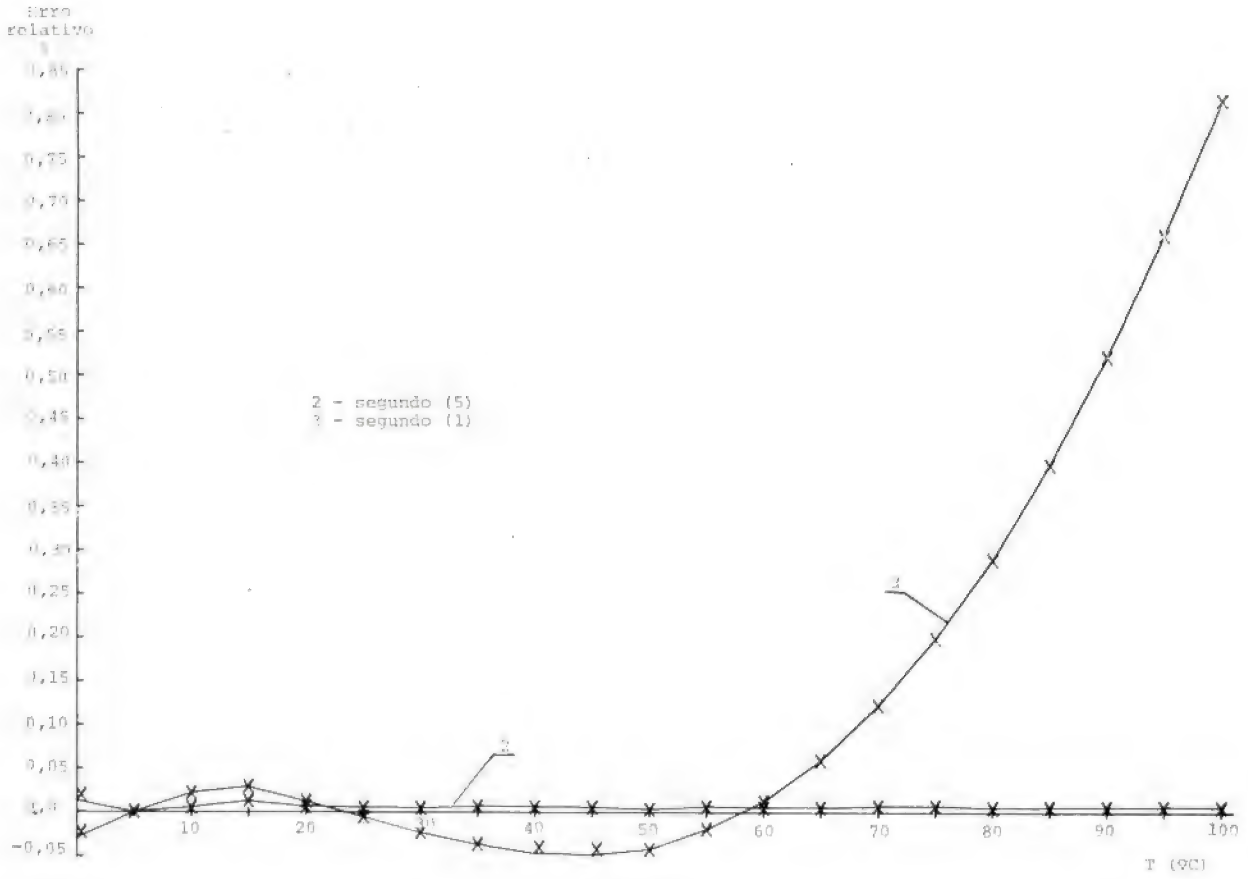
[2] **Jones, W. P.**, *Air Conditioning Engineering*, Edward Arnold (Publishers), London, 2nd edition, 1973.

[3] **Mayhew, Y. R.; Rogers, G. F. C.**, *Thermodynamic and Transport Properties of Fluids — SI units*, Basil Blackwell, 1967.

[4] *National Bureau of Standards Circular* N.º 564.

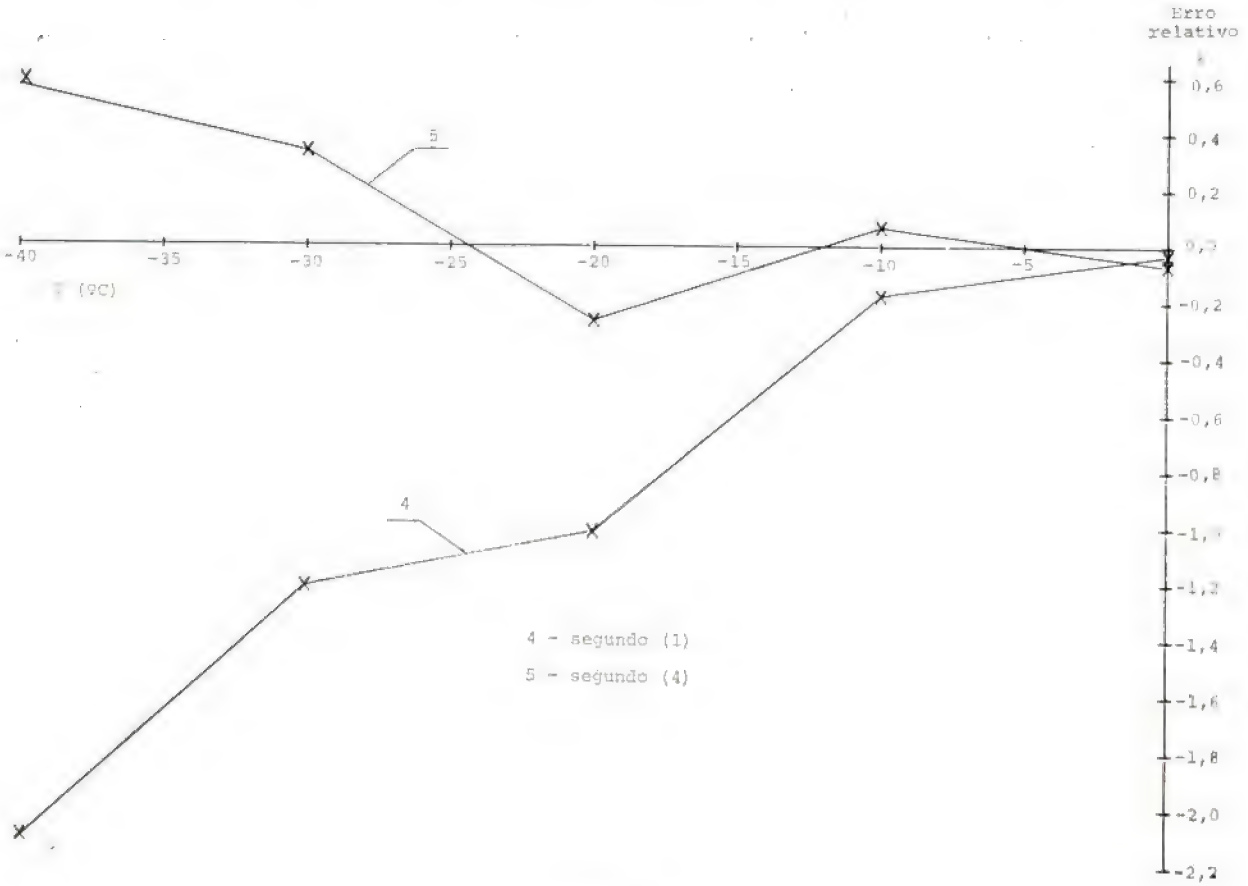
[5] *National Engineering Laboratory Steam Tables, 1964.*

[6] **Porchier, G.**, *Cours de climatisation*, Tome I, E. D. I. P. A., 1973.



ANEXO 1

Erro relativo das expressões da pressão de saturação de vapor de água a temperaturas positivas



ANEXO 2

Erro relativo das expressões da pressão de saturação de vapor de água a temperaturas negativas

O homem e a técnica

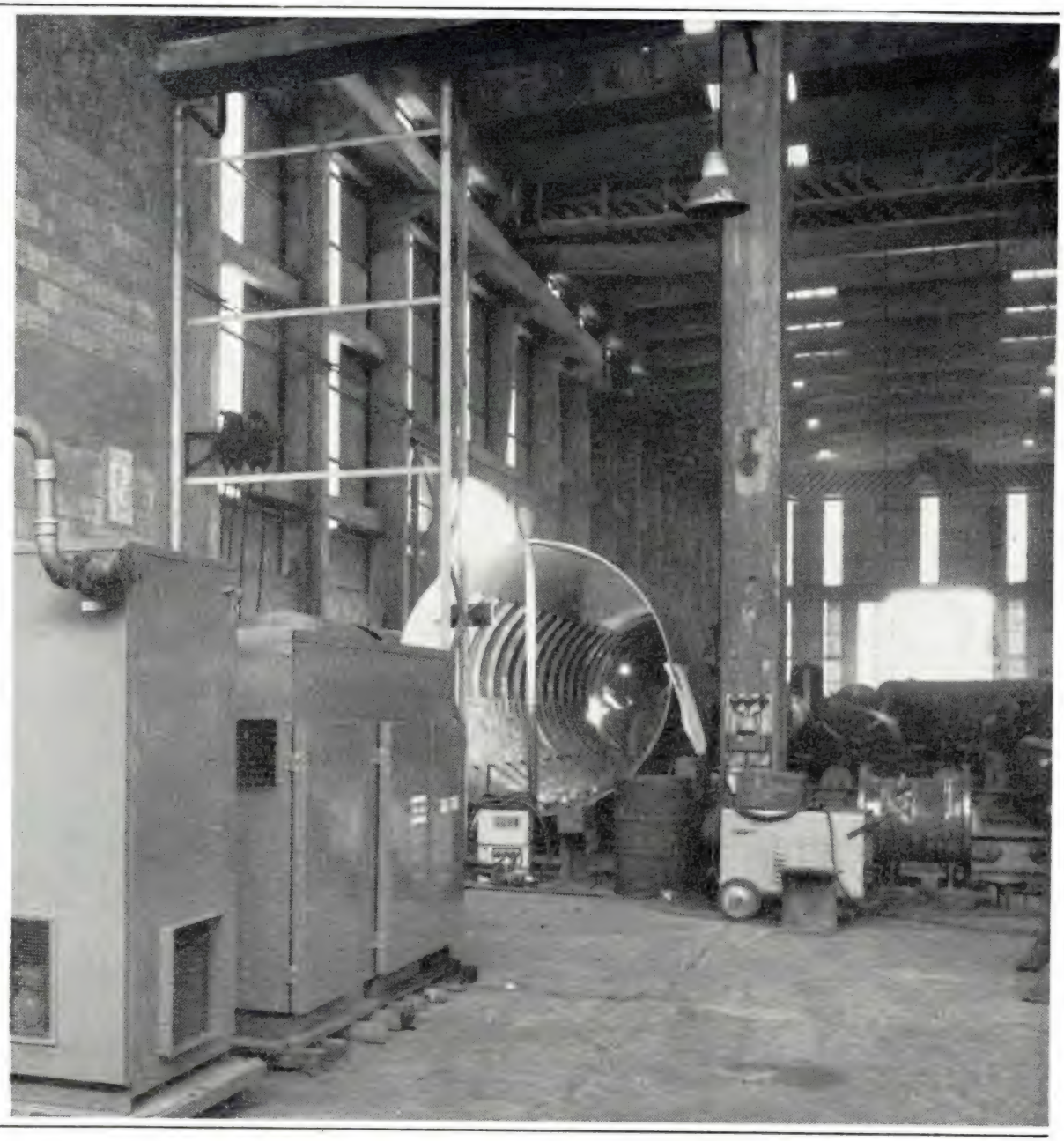
O homem desenvolveu a tecnica, ao ritmo da sua propria evolução. Criou tecnicas que lhe permitiram dominar e transformar a Natureza.

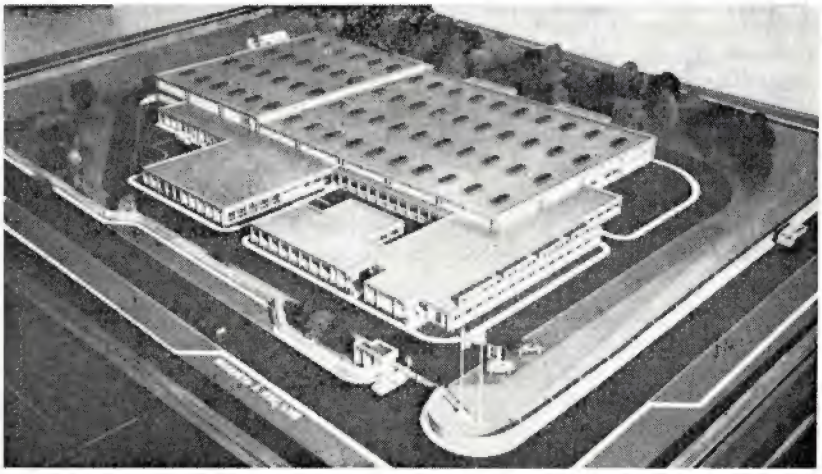
O homem construiu pequenas industrias artesanais. Progressivamente atinge a media e a grande industria. Tira o maximo rendimento das materias primas de que dispõe.

E tudo isto graças a evolução da tecnica que ele proprio criou.

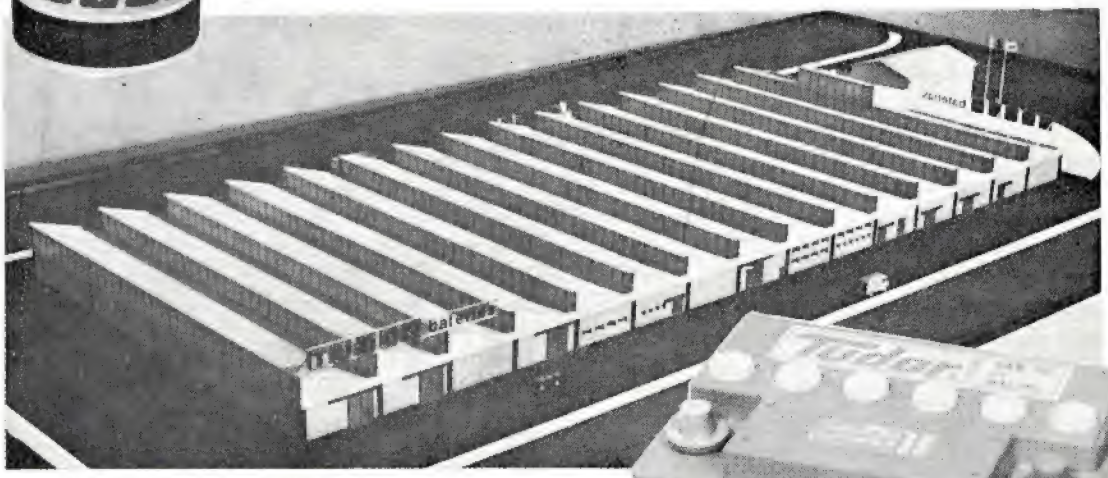
A Atlas Copco acompanha essa evolução. Fornece "know-how", tecnica e equipamento no dominio do ar comprimido e não so.

Atlas Copco





NOVA FABRICA DE PILHAS EM COLARIDE (CACEM)



NOVA FABRICA DE BATERIAS EM CASTANHEIRA DO RIBATEJO

Tudor®

novas fábricas
novas pilhas
novas baterias

Tudor uma empresa virada para o futuro

Estudo retrospectivo de cimento Portland de alta resistência inicial com teores de magnésia reputados anormais (*)

M. A. TEIXEIRA DE CASTRO
Engenheiro consultor

SUMÁRIO

A Memória dá ênfase à inocuidade da presença da magnésia no cimento Portland, pelo menos dentro dos limites referidos.

Alude preliminarmente às propriedades essenciais do cimento Portland desde o alvor de sua industrialização as quais, vindo-se apromorando, têm originado diversificação de características capazes de satisfazer exigências sempre crescentes.

Faz um retrospecto das propriedades de cimento Portland comum fabricado no Brasil, no decorrer de anos consecutivos, com propriedades perfeitamente normais, em que os índices de resistência crescem com os teores de MgO.

Baseado no êxito industrial é se levado a produzir cimento de alta resistência inicial, mesmo em presença de altos teores de MgO, com resultados perfeitamente satisfatórios.

Procura dar uma interpretação aos resultados obtidos e cita alguns experimentadores alheios.

Finalizando faz uma série de recomendações tendentes à obtenção de cimento Portland de alta resistência inicial mesmo em presença de elevados teores de MgO.

SYNOPSIS

The Study emphasizes that magnesia is innoxious to Portland cement within the limits referred into.

The fact, that the main properties of Portland cement since its early manufacture days have been in a continuous progress, has led to diversify properties capable to meet enlarging requirements.

It is given a retrospective view of ordinary Portland cement produced in Brasil in the course of consecutive years, properties of which are quite normal, the strength increasing with the magnesia content.

In view of that success it was conceived to produce high early strength Portland cement with unusual magnesia content, properties of which are quite satisfactory.

It is looked for an interpretation of the results and a few searchers are cited.

Finally a few factors, that would enable the production of high early strength Portland cement with high magnesia content, are pointed out.

GENERALIDADES

Desde o início de sua manufactura, então, por assim dizer, empírica, tem o cimento Portland, neste longo período de um século e meio, vindo sendo continuamente sujeito a tantos aperfeiçoamentos e progressos na técnica de fabricação, não só pelo emprego de equipamentos cada vez mais adequados e eficientes como também pela utilização de métodos científicos de análise e exame, a ponto de o cimento então produzido, pela primeira vez por Joseph Aspdin, possuir qualidades deveras medíocres, em contraste desencorajador com as dos cimentos Portland actualmente produzidos. Não que deixasse de comportar-se similarmente aos actuais, isto é, que deixasse de possuir fundamentalmente aquelas propriedades que caracterizam essencialmente o cimento Portland tais como manifestadas, na sua aplicação, pela trabalhabilidade, plasticidade, indeformabilidade, inalterabilidade, durabilidade e elasticidade, mas sua hidraulicidade apresentava índices muito inferiores aos que subsequentemente iam sendo atingidos.

De início o que se tinha em mira precipuamente era o endurecimento em presença de água, isto é, a mera obtenção de hidraulicidade da qual derivariam as propriedades acima referidas, sem a preocupação de

(*) Trabalho apresentado ao 2.º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 4 a 7 Julho, 1977.
Manuscrito recebido para publicação em 13/9/77.

lhes serem atribuídos valores. Porém, à medida que as obras de engenharia iam tomando vulto, se intensificando e diversificando, aquelas propriedades, em face de exigências consequentemente cada vez maiores, tiveram de ser forçosamente levadas a um gradativo aperfeiçoamento. Mais tarde, com o advento do concreto armado e ulteriormente do concreto protendido, foi tomando incremento a necessidade de assegurar resistências cada vez mais elevadas.

Como decorrência de o cimento Portland ter as aplicações mais diversificadas e em meios diferentes, seu comportamento está sujeito a variar em presença das solicitações a que é submetido e do meio que o circunda. Assim, embora fundamentalmente o cimento Portland se caracterize por certas propriedades gerais maxime a hidraulicidade da qual decorre o endurecimento em presença de água, outras surgem e se manifestam, cujos graus de intensidade variam não só com o valor intrínseco do cimento mas também em função do meio em que é aplicado.

Dest'arte tiveram pois de surgir exigências específicas conforme os casos a enfrentar nas aplicações diversificadas do cimento Portland tais como as que se relacionam com a agressividade das águas salinas, com as massas ciclópicas de concreto, com as construções aceleradas, com as estruturas altamente solicitadas, com a imunidade a certos agregados, etc. Quer dizer; tiveram que ir-se imprimindo ao cimento Portland, avivando-as, propriedades tais que, sem sair da linha mestra derivada da hidraulicidade que lhe é peculiar, lhe assegurassem certas características suplementares que, longe de perturbar o mecanismo fundamental das reacções hidráulicas, antes o tornassem mais apto à obtenção das qualidades desejadas na sua finalidade específica. Surgem assim, pois, como diversificações do cimento Portland, além do comum, o

de baixo calor de hidratação,
de endurecimento rápido,
de alta resistência inicial,
imune às águas salinas,
imune à reactividade de agregados,

entre os principais.

Para enfrentar tal diversificação e consequentes exigências o produto terá de ser fabricado em condições tais que lhe sejam asseguradas as características almejadas, peculiares a cada variedade, produzida, bem entendido, uma de cada vez. Como o processo manufactureiro é contínuo, a mudança duma variedade para outra numa mesma fábrica pode resultar obviamente complicada se se pretender executá-la abruptamente.

Dependendo fundamentalmente a qualidade do produto acabado da sua constituição química e estrutural, a instalação existente disponível, com seu aparelhamento mecânico, pneumático e térmico, desempenha todavia papel também preponderante na sua consecução. De modo que, tendo de jogar com a matéria-prima antes do que com qualquer outro factor relativo aos processos inerentes ao seguimento da fabricação, não podendo mudar de instalação dum momento para outro e bem assim tendo de aceitar as matérias-primas tais como ocorrem nas jazidas abastecedoras, adviria ao fabricante um problema árduo ao ter de enfrentar uma mudança brusca e radical na qualidade do produto. Assim, uma vez implantada a instalação, procura-se no processo manufactureiro chegar, em presença das condições existentes, ao melhor desiderato possível não podendo, sem sacrifício de maior ou menor monta, ir variando substancialmente as características do produto a cuja uniformidade busca tanto quanto possível cingir-se. Por esse motivo, pelo menos em parte, e por não ter havido procura suficientemente justificativa, não têm surgido senão em escala reduzida no Brasil a fabricação dessas qualidades diversificadas embora a indústria de cimento Portland já aqui perdure há meio século.

Entre as variedades que têm merecido particular atenção destaca-se o cimento Portland de alta resistência inicial, cuja fabricação teve início há umas quatro décadas e em torno do qual têm sido efectuados estudos [1] e surgido discussões.

O presente trabalho não é senão uma continuição ou, melhor, condensação de algo que o autor tem feito a esse respeito, baseado em cimentos industrialmente produzidos.

RETROSPECTO DE CIMENTOS PORTLAND COMUNS COM TEORES CRESCENTES DE MgO

Como atrás dito, procura-se em geral, com todas as variáveis que entram em jogo no decorrer da fabricação, chegar a um desiderato considerado óptimo. Consegue-se assim, nessa ordem de ideias, melhorar gradativa e consideravelmente as propriedades mecânicas dum cimento Portland comum tais como assinaladas na Tabela I e representadas nos Gráficos 1 e 2. Os cimentos designados por A, B, C, D e E correspondem aos produzidos em anos consecutivos a partir do início da fabricação. A ordem alfabética equivale à cronológica e os dados abrangem de per si todos os obtidos, nos respectivos anos, sobre cimento periodicamente produzido e ensaiado.

Os métodos de ensaio, sendo anteriores à elaboração do BM-1 (*), divergem deste mas, para efeito de comparação, não afectam em nada as ilações localizadas no presente estudo porquanto os ensaios foram todos executados em idênticas condições e pelo mesmo operador.

Os ensaios à tração, ao tempo quase universalmente praticados, recairam sobre argamassa destituída de plasticidade, de traço 1:3 em peso, sendo a areia de rio graduada entre 0,6 e 0,85 mm e a água empregada ao redor de 10 % sobre o peso do material sólido total. Moldagem feita manualmente mediante espádula em formas metálicas com o feitio de oito, cuja secção intermédia, onde se dava a ruptura, media exac-

(*) Método de Ensaio Padrão Brasileiro.

tamente uma polegada quadrada. Esse método, embora tanto divergente, se assemelhava ao método adoptado pela ASTM nos E. U. A. sob a designação de C 190 [2].

Os ensaios à compressão recaíam sobre argamassa plástica, de traço 1:5 em peso, cuja consistência, obtida numa mesa semelhante à actualmente padronizada no MB-1, correspondia a um aumento duas vezes o diâmetro inicial da argamassa após 30 pancadas sucessivas, enquanto no MB-1 o diâmetro da argamassa, após as pancadas, deve sofrer um aumento de $1\frac{1}{3}$ vezes, quer dizer, a argamassa então ensaiada era mais húmida do que a actual argamassa normal. Evidentemente, tratando-se dum traço mais fraco e de consistência mais aquosa, o factor água/cimento teria de ser consideravelmente maior do que o geralmente obtido quando da adopção do MB-1. A areia empregada era composta, graduada, com módulo de finura 3,75 e tamanho máximo de 9,5 mm. Os corpos de prova eram cubos de 7,5 cm de aresta.

Passando-se ao exame dos Gráficos 3 e 4 depara-se flagrante ascensão nas resistências mecânicas em presença de teores paralelamente crescentes de MgO, que variam de 4,3 a 7 %, conforme elucidado pela Tabela II, que resume as características químicas disponíveis relativas aos cimentos a que tais Gráficos se referem. Do exame das Tabelas I e II se infere que as resistências aumentam invariavelmente em presença de teores crescentes de MgO, sendo essa mesma tendência acompanhada pelo silicato tricálcico ou pela

TABELA I

Características físicas e mecânicas de cimentos Portland comuns constantes da Tabela II

DESIGNAÇÃO		A	B	C	D	E
FINURA, ∠ 74 μ, %		85,3	85,2	86,0	85,5	87,1
PEGA, Início, H.m		1.30	2.10	2.45	2.30	2.20
CONSISTÊNCIA NORMAL, água em peso, %		25,1	24,9	25,3	25,3	25,3
EXPANSÃO, Le Chatelier, mm		3	7	5	4	6
RESISTÊNCIA, k/cm²						
TRAÇÃO	1 d	—	—	—	—	15,6
1:3 em peso	2 d	—	—	—	—	19,6
Areia entre 0,6 e 0,85 mm	3 d	—	13,5	16,0	17,5	24,2
	7 d	13,4	16,0	18,3	20,7	26,0
Água, 10 % sobre material seco .	28 d	17,4	18,6	20,2	23,1	27,5
	3 m	19,1	19,6	20,9	23,6	26,4
COMPRESSÃO	2 d	—	—	75	94	101
1:5 em peso	3 d	—	—	104	122	131
Areia graduada, mod. 3,75, tamanho máx. 9,5 mm	7 d	—	—	149	167	181
	28 d	—	—	223	240	249
	3 m	—	—	282	292	292
Consistência, alargamento X2 ...	6 m	—	—	295	308	—
Água/Cimento		—	—	0,799	0,783	0,786

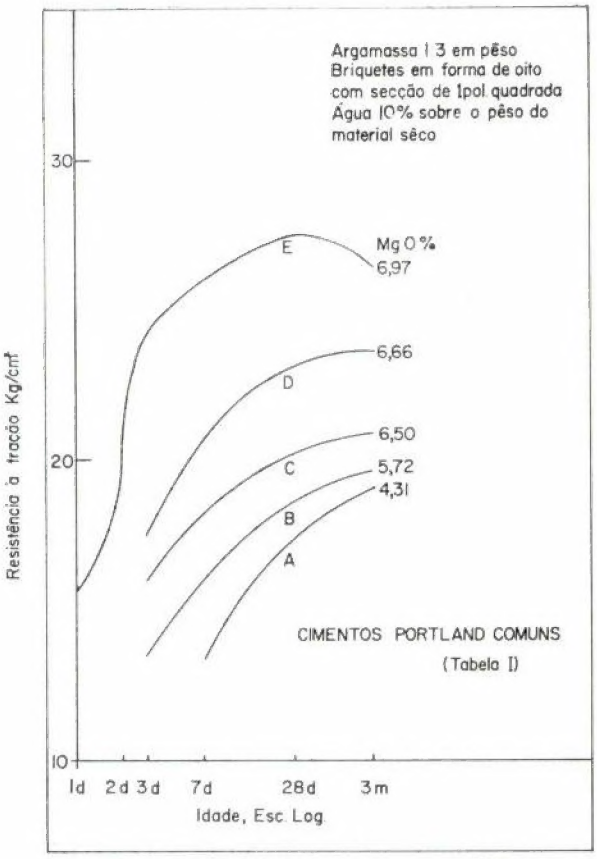


Gráfico 1

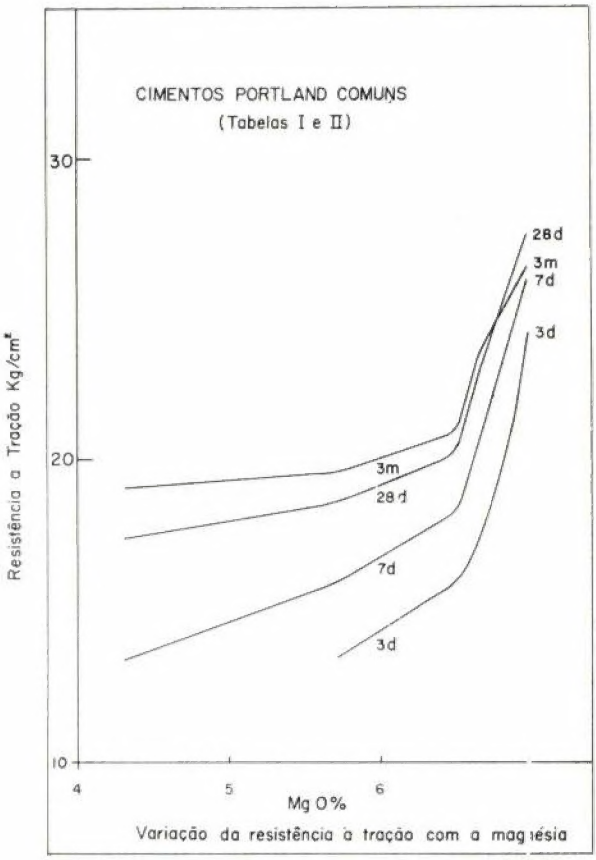


Gráfico 3

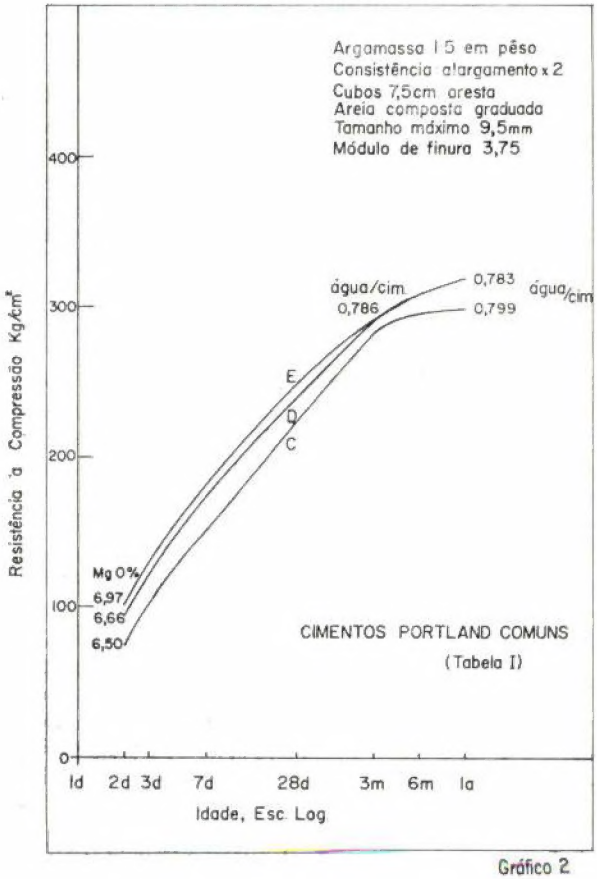


Gráfico 2

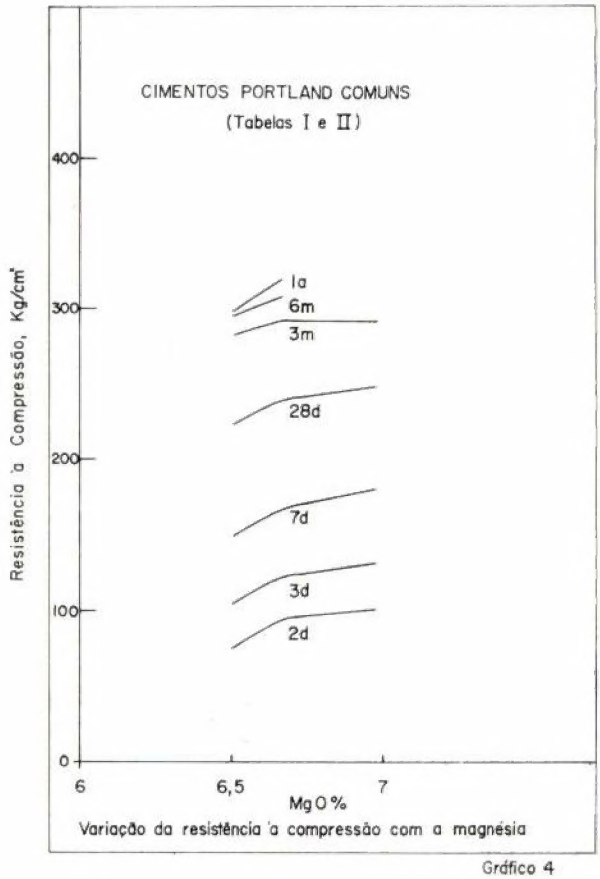


Gráfico 4

TABELA II

Características químicas de cimentos Portland comuns constantes da Tabela I

DESIGNAÇÃO	A	B	C	D	E
	P O R C E N T O				
ANÁLISE QUÍMICA					
Res. Insolúvel	nd.	nd.	0,14	0,14	0,11
SiO_2	22,55	21,75	21,17	21,06	20,63
Al_2O_3	6,77	5,93	5,69	5,82	5,65
Fe_2O_3	2,63	2,13	2,22	2,21	2,24
CaO	60,92	62,23	62,01	62,02	62,33
MgO	4,31	5,72	6,50	6,66	6,97
SO_3	1,51	1,26	1,03	1,12	1,14
Perda ao fogo	1,38	0,98	0,83	0,66	0,70
Total	100,07	100,00	99,59	99,69	99,77
CONSTITUIÇÃO POTENCIAL (*) calculada segundo Bogue					
C_3S	23,1	41,6	47,2	47,0	52,6
C_2S	47,2	31,0	25,1	24,9	19,5
C_3A	13,5	12,1	11,3	11,7	11,2
C_4AF	8,0	6,5	6,7	6,7	6,8
$CaO.SO_3$	2,6	2,1	1,8	1,9	1,9
C_3S/C_2S	0,49	1,34	1,88	1,89	2,70

(*) No presente Estudo adoptaram-se fórmulas químicas simplificadas dos constituintes do cimento Portland, tais como:

C_3S — $3CaO.SiO_2$

C_2S — $2CaO.SiO_2$

C_3A — $3CaO.Al_2O_3$

C_4AF — $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

relação C_3S/C_2S. A única discrepância é uma reversibilidade que ocorre aos 3 meses com o cimento E, facto esse aliás comum aos ensaios à tração em idades alongadas.

Ressalta imediatamente que, pelo menos, a magnésia não constitui um óbice à elevação da resistência nem, tão pouco, se afigura um factor adverso que afecte a hidraulicidade e integridade do cimento. Com a elevação de seu conteúdo conseguiu-se melhorar a qualidade sem que isso implicasse em modificar substancialmente qualquer detalhe no curso da fabricação. Apenas se recorreu a um proporcionamento cada vez mais adequado das matérias-primas de modo a permitir a formação de silicato tricálcico no mais alto grau compatível com as condições existentes, tornando-se sua elevação tanto mais necessária quanto mais alto o teor de magnésia presente, dentro naturalmente de certos limites, mas os resultados bem indicam quão longe ainda se pode ir no que diz respeito a substâncias que foram consideradas outrora não só inertes mas também activamente adulterantes e perigosas. E de tal modo que, do exame mais atento dos resultados, bem se evidencia que a causa determinante dessa melhoria na qualidade do cimento, assinalada pela progressiva ascensão na resistência, reside não propriamente na magnésia em si mas no constituinte de maior poten-

cialidade hidráulica do clínquer, em cuja formação ígnea a magnésia, dela participando, deve ter beneficamente intervindo.

Quanto à constância de volume foram os cimentos naturalmente submetidos ao ensaio então seguido e ulteriormente adoptado pela ABNT (*), em 1937, tal como consta do MB-1 [3]. Os resultados, embora dentro do limite imposto pela EB-1 [4], afiguraram-se um tanto elevados mas releva notar que esse ensaio era executado sobre cimentos acabados de produzir para os quais, após sazonados ou arejados num curto período de tempo, esses resultados praticamente se nulificavam. É bem de ver que a causa determinante desse fenómeno residia na cal que restara livre em quantidade maior ou menor, já que as reacções e combinações no decorrer da clinquerização não eram levadas a um grau de complementação que mais tarde se tornou usualmente praticável pela obtenção de misturas mais finamente subdivididas, mais intimamente homogeneizadas e mais intensamente calcinadas.

CIMENTOS PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL, COM TEORES ELEVADOS DE MgO

Em face dos resultados atrás apresentados evidenciava-se a possibilidade de prosseguir na obtenção de resistências ainda mais elevadas se bem que não se procurasse atingir esse fim simplistamente a partir da elevação do óxido de magnésio. Este elemento associado, em maior ou menor grau, aos calcários, quer no estado de carbonato sob a forma de dolomita e mais raramente de magnésita, quer no de silicatos mais ou menos complexos, tem constituído por vezes um entrave na selecção das matérias-primas. Em virtude da intensificação e desenvolvimento da indústria de cimento Portland, vão-se deparando calcários com teores cada vez mais elevados daquele elemento de modo que a utilização de calcários sucessivamente mais magnesianos vai-se tornando cada vez mais premente.

Tem-se procurado, como medida de auto-defesa, beneficiar certos calcários, principalmente aqueles onde a magnésia ocorre sob a forma de silicatos, facilmente pulverizados e elimináveis, tendo-se conseguido, mediante britagem, peneiração e lavagem, reduções apreciáveis que no produto acabado se reflectem em escala aumentada da ordem de $1\frac{1}{2}$ vezes. Já sob a forma carbonatada não é possível erradicar a magnésia senão recorrendo a tratamentos químicos e físico-químicos que redundariam economicamente proibitivos para o suprimento da fabricação de cimento Portland.

Assim, partindo de matérias-primas usualmente empregadas no fabrico de cimento Portland comum, dirige o autor a atenção para a obtenção de cimento Portland de alta resistência inicial, com teores de MgO invulgares para esta variedade de cimento sem serem contudo dispares em relação aos que usualmente se deparam no cimento Portland comum.

O cimento Portland de alta resistência inicial, como sua designação mesmo indica, é um cimento Portland que deve atingir, nas primeiras idades, resistências comparáveis às que se obtêm em idades mais avançadas nos cimentos ditos comuns, de tal forma que, em geral, o primeiro assegura resistências finais num nível ainda mais elevado que o obtido com o cimento Portland comum. É, por assim dizer, um cimento dotado de potencialidade revigorada, isto é, levada ao máximo. Para atingir esse desiderato torna-se pois necessário estabelecer condições de fabrico tais que permitam propiciar a obtenção do constituinte dotado de mais forte hidraulicidade que se reduz essencial e esquematicamente, como atrás dito, sob o ponto de vista termo-químico, ao silicato tricálcico, cuja predominância deve ser inexoravelmente assegurada. É este porém um dos constituintes do cimento Portland cuja formação se torna tanto mais difícil quanto maior for a basicidade da mistura calcário-argilosa que lhe vai dar lugar, por realizar-se igneamente sob a forma sólida, sendo não obstante facilitada em concomitância de fase líquida que é determinada principal e proporcionalmente pelo óxido de ferro, dentro de certos limites e, quiçá, até um certo ponto pela magnésia se bem que em menor grau. Conseguiu-se assim com a elevação do ferro, a uma temperatura menos alta, reduzindo a quantidade de CaO livre ao mínimo, obter o máximo de silicato tricálcico, tal como apresentado na Tabela III.

Embora residindo essencialmente na estruturação mineralógica do clínquer a potencialidade hidráulica que ulteriormente se evidencia em contacto com água, torna-se necessário demais, para que essa hidraulicidade seja levada ao máximo de eficiência, que às partículas em que o cimento se subdivide se assegure um máximo de dispersão e reactividade, o que se torna praticável pelo maior estado de subdivisão a que o cimento é levado.

Assim o cimento Portland, após produzido tal como ordinariamente, foi submetido a nova moagem tendo sido necessário, para normalizar a pega, incorporar-lhe gesso adicional. O grau de finura foi levado tão longe que os cimentos, tanto os da Tabela III como os da Tabela IV, atingiram uma superfície específica, tal como determinada pelo turbidímetro de Wagner, da ordem de 3000 cm^2/g enquanto para os cimentos comumente fabricados a superfície específica era da ordem de 1800 a 2000 cm^2/g.

Os cimentos constantes da Tabela III, cujas resistências à compressão estão separadamente representadas no Gráfico 5, são dotados de características físicas e mecânicas que os colocam inquestionavelmente no campo dos cimentos de alta resistência inicial. Já os constantes da Tabela IV, representados no Gráfico 6, que também foram produzidos para idêntica finalidade, ficaram abaixo dos dois primeiros referidos, constantes da Tabela III. Para estes, porém, que ultrapassaram plenamente os valores de resistência exigidos para o cimento Portland de alta resistência inicial, o constituinte férrico é consideravelmente mais elevado e a relação C3S/C2S é também em geral mais alta do

(*) Associação Brasileira de Normas Técnicas.